



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

**Sander Kukk**

**SÜSINIKTERASE TSEMENTIITIMINE TEHNIKAINSTITUUDI  
TERMIKA LABORIS**

CARBON STEEL CARBURIZING IN THE INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY'S HEAT TREATMENT LABORATORY

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: nooremteadur Kaarel Soots, *MSc*

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Sander Kukk		Õppekava: tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Süsinikterase tsementiitimine tehnikainstituudi termika laboris			
Lehekülgi: 52	Jooniseid: 16	Tabeleid: 10	Lisasid: 6
Osakond: Põllundus- ja tootmistehnika osakond			
Uurimisvaldkond:			
ETIS teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika			
ETIS teaduseriala: 4.12. Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus			
CERCS teaduseriala: T150 Materjalitehnoloogia			
Juhendaja: nooremteadur Kaarel Soots MSc			
Kaitsmiskoht ja –aasta: Tartu, 2017			
<p>Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valmistada ette laboratoorne töö tsementiitimise läbiviimiseks tehnikainstituudi termika laboris. Tsementiitimine on termokeemilise töötlemise protsess, mille käigus rikastatakse madala süsinikusisaldusega teraste pinda difusiooni teel süsinikuga. Eesmärgiks on saavutada pind, mis oleks kõva ja kulumiskindel, kuid omaks pehmet ning sitket südamikku. Antud protsess on laialt kasutatav erinevate jõuülekande detailide tootmisel, mis peavad omama suurt kulumiskindlust ning olema vastupidavad dünaamilisele koormusele. Töö praktilises osas viidi kolme katseseeria käigus läbi tsementiitimise protsess kokku viiele katsekehale ning lisaks teostati detailidele termiline töötlemine. Tulemuste analüüsi käigus määrati kõikide katsekehade pinnakõvadus ning rikastatud kihi sügavus. Maksimaalseks lõplikuks pinnakõvaduseks peale noolutamist määrati 647,9 HV1/15 (56,42 HRC), mis mõõdeti noolutatud katsekeha KK5 pinnalt. Rikastatud kihi sügavuse mõõtmisel tsementiititud katsekeha KK1 kolmes erinevas sektoris saadi keskmiseks tulemuseks 0,9976 mm. Lisaks teostati kõikidele katsekehadele struktuurianalüüs, mille käigus määrati mikroskoobi abil erinevad struktuuriosad nii detaili rikastatud servakihis kui ka südamikus. Töö tulemusena täideti püstitatud eesmärk ja valmistati täielikult ette tsementiitimise laboratoorne töö. Töö jätku-uuringud võiksid seisneda tsementiitimise mõjus erineva keemilise koostisega terastele.</p>			
Märksõnad: pindkõvadus, rikastamine, struktuurianalüüs, termotöötlemine, karbonisaator			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Sander Kukk		Speciality: engineering and technology	
Title: Carbon steel carburizing in the Institute of Technology's heat treatment laboratory			
Pages: 52	Figures: 16	Tables: 10	Appendixes: 6
Department: Agricultural and Production Engineering			
Field of research:			
ETIS field of research: 4. Natural Sciences and Engineering			
ETIS scientific speciality: 4.12. Process Technology and Materials Science			
CERCS scientific speciality : T150 Material technology			
Supervisor: junior researcher Kaarel Soots MSc			
Place and date: Tartu, 2017			
<p>The purpose of this bachelor's thesis is to prepare laboratorial work to perform carburizing in the Institute of Technology's heat treatment laboratory. Carburizing is a heat treatment process in which steel absorbs carbon while the metal is heated in the presence of a carbon-bearing material. The intent is to make the outside layer harder while the core stays softer. This process is widely used in the production of powertrain parts which have to be hard and wearproof, but durable to dynamic loads. To perform the process it was necessary to determine initial process parameters: heating temperature, holding time and the amount of the carbonator. In the practical part of the present thesis 3 carburizing processes were carried out to 5 samples in total. Also the heat treatment was carried out. In the analysing process the hardness of the surface and the depth of the enriched surface for each sample was thoroughly studied. The maximum hardness of the surface was 647,9 HV1/15 (56,42 HRC), which was measured from the sample KK5 after tempering. The average depth of the enriched surface was 0,9976 mm, which was measured from the carburized sample KK1. These results were in accordance with expectations and process parameters. Furthermore the complete structural analysis was carried out using proper laboratory equipment. The results of this present thesis are useful to understand the carburizing process, to compose comparative analyzes and to be used in student projects. Any further surveys should investigate the effect of carburizing to different marks of steels.</p>			
Keywords: case hardening, structural analysis, enrichment, heat treatment, carbonator			

# SISUKORD

SISUKORD .....	4
SISSEJUHATUS .....	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA PRAKTLINE KASUTUS .....	6
1.1. Pindkarastamine.....	6
1.2. Nitriitimine.....	7
1.3. Tsüaanimine ja nitrotsementiitmine .....	7
1.4. Sulfotsüaanimine .....	8
1.5. Pinnakihi rikastamine metallidega.....	8
1.6. Tsementiitimine.....	8
1.7. Teras pindtugevdamine tööstuses.....	13
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	16
2.1. Kasti projekteerimine ja valmistamine .....	16
2.2. Parameetrid tsementiitimiseks ja protsessi läbiviimine .....	17
2.3. Katsekehade ettevalmistamine tulemuste analüüsiks .....	22
2.4. Labortöö juhendi koostamine .....	26
2.5. Ohutustehnika eeskirja täiendamine .....	27
3. TULEMUSED JA TULEMUSTE ANALÜÜS .....	28
3.1. Rikastatud kihi sügavuse ja kõvaduse määramine.....	28
3.2. Katsekehade struktuuri analüüs .....	29
3.2.1. Teras algolekus.....	29
3.2.2. Teras tsementiidituna.....	30
3.2.3. Teras normaliseerituna .....	31
3.2.4. Teras karastatuna.....	32
3.2.5. Teras noolutatuna .....	33
KOKKUVÕTE .....	35
KASUTATUD KIRJANDUS .....	36
SUMMARY .....	38
LISAD .....	39
Lisa 1. Tsementiitimise kasti ja tõsteroobi tehnilised joonised.....	40
Lisa 2. Tsementiitimise labortöö blankett .....	45
Lisa 3. Täiendatud termika labori ohutustehnika eeskiri .....	47
Lisa 4. Pinnakõvaduse määramise mõõtmistulemused.....	49
Lisa 5. Tsementiiditud katsekeha struktuuripildid koos rikastatud kihi sügavuse mõõtmistulemustega .....	50
Lisa 6. Noolutatud katsekehade struktuuripildid .....	51

## SISSEJUHATUS

Tsementiitimine on termokeemilise töötlemise protsess, mille käigus rikastatakse süsinikuvaeste teraste pinda difusiooni teel süsinikuga. Protsessi eesmärgiks on saavutada kõva ja kulumiskindel pind, mis omaks samas pehmet ja sitket südamikku. Antud protsess on laialt kasutatav erinevate jõuülekande mehhanismide detailide tootmisel, mis peavad olema suure kulumiskindlusega, aga samas ka vastupidavad dünaamilisele koormusele ja löökdeformatsioonile. Eriti suurt rolli omab terase pindtugevdamine just rasketööstuses, kus erinevate võllide ja hammasrataste vahetamine on ajamahukas ning kallisk töö. Seega on oluline, et tulevased inseneritehnilise haridusega spetsialistid teaksid terase pindtugevdamise protsesside teostamise põhimõtteid ning oskaksid hinnata nende tulemust. [1]

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valmistada ette laboratoorne töö tsementiitimise läbiviimiseks tehnikainstituudi termika laboris. Lähtudes töö eesmärgist on antud töö ülesanneteks anda ülevaade terase pindtugevdamise meetoditest, projekteerida protsessi läbiviimiseks kast, protsessi läbiproovimine, katsetulemuste analüüsimine ja labortöö blanketi koostamine. Töö teema uudsus peitub asjaolus, et praegu puudub õppeaine TE.0244 Materjaliõpetuse ainekavas labortöö, mis käsitleks teraste termokeemilist töötlemist. Tsementiitimine on seejuures küllaltki lihtne ja ohutu protsess, mida saab tehnikainstituudi termika laboris olevate seadmetega läbi viia. Seetõttu eelistati seda meetodit näiteks nitriitimisele ja tsüaanimisele.

Töö koosneb kolmest peatükist, millest esimene annab põhjaliku ülevaate terase pindtugevdamise meetoditest ning nende kasutusvaldkonnast. Lisaks kirjeldatakse täpsemalt tsementiitimise läbiviimist nii laboris kui ka tööstuslikes tingimustes. Teises peatükis kirjeldatakse tsementiitimiseks vajaliku kasti projekteerimist ja valmistamist ning antakse üksikasjalik ülevaade läbiviidud katsetest. Kolmas peatükk keskendub kastetulemuste analüüsile, mille käigus teostatakse struktuurianalüüs mikrolihvide põhjal ning määratakse rikastatud kihi parameetrid.

Käesolev bakalaureusetöö annab põhjaliku ülevaate tsementiitimise protsessist, vajaminevatest tehnilistest seadmetest ning antud protsessi iseärasustest. Antud töö tulemused on suureks abiks neile, kellel on huvi antud protsessi vastu ning kes soovivad saada ülevaadet erinevatest terase pindtugevdamise meetoditest, et rakendada neid näiteks tudengiprojektide koostamisel.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA PRAKTLINE KASUTUS

## 1.1. Pindkarastamine

Levinuimaks terase pindtugevdamise meetodiks on pindkarastus, mis annab detaili pinnakihi suure kõvaduse ja tagab kulumiskindluse, aga säilitab detaili vastupanuvõime dünaamilise iseloomuga koormustele. Kõikide pindkarastamise meetodite puhul kuumutatakse kiiresti karastustemperatuurini vaid detaili pinnakiht. Kuumutamist teostatakse atsetüleenihapnikuleegiga, induktsioonvooludega, elektrolüütides ning laser- või elektronkiirega. Pindkarastuse kõigi viiside olemus põhineb sellel, et pind kuumutatakse kiiresti üle faasipiiride. Seejärel tuleb kuumutamine katkestada ning detail jahutada sellise kiirusega, mis on suurem kui terase kriitiline karastuskiirus. Selliste protsesside käigus detaili südamik üldjuhul ei karastu. [1]

Leekkarastusel kuumutatakse detaili pinda atsetüleenihapnikuleegis ning jahutatakse veejoas. Detaili pinnakiht kuumeneb erinevalt südamikust palju kiiremini. Selline meetod tagab 0,4–0,5% süsinikusisaldusega teraste puhul karastatud kihi paksuseks 2–5 mm ning pinnakõvaduse kuni 58 HRC. Survepingete tõttu pinnakihis on sellised detailid ka vastupidavamad väsimusele. Leekkarastust kasutatakse kõige enam üksiktootmisel, sest antud protsess pole väga lihtsasti automatiseeritav. [1]

Induktsioonkarastuse korral kuumutatakse detaili induktori magnetväljas tekkivate pöörisvoolude toimel. Detaili pinnakiht jahutatakse pärast seisutusaega vastavas karastuskeskkonnas. Antud protsessi puhul saab reguleerida ka karastatava pinnakihi sügavust–mida suurem on voolusagedus, seda väiksem on kuumutatava kihi paksus. Kasutusel on kõrgsagedusvool vahemikus 500–10 000 000 Hz. Antud protsess on lihtsasti automatiseeritav, tootlik ja lihtsasti kontrollitav. [1]

Elektrolüütkarastusel asetatakse detail elektrolüüdi sisse, milleks on üldjuhul 5–10% kaltsineeritud sooda vesilahus. Alalisvool tekitab katoodi ümber õhukese vesinikukihi, mille halvast elektrijuhtivusest tingituna voolutugevus suureneb ning põhjustab detaili kuumenemise. Karastusprotsess toimub voolu väljalülitamisel samas elektrolüüdis. [1]

Laser- ja elektronkiirkarastust teostatakse vaakumis, mille tõttu on piiratud detailide mõõtmed ja seega ka meetodi kasutatavus. Detaili pinda kuumutatakse laser- või elektronkiirega ning selle tulemusena tekivad 0,02–2 mm tagant karastusvöödid. Antud

meetodit kasutatakse näiteks erikoostisega sulamite saamiseks, pinna ülessulatamiseks või väsimuskindlate pinnete saamiseks. [1]

## **1.2. Nitriitimine**

Termokeemilise töötamise olemus seisneb selles, et difusiooni mõjul toimub detaili pinnakihi keemilise koostise muutmine. Protsessi tulemusena moodustab atomaarne element detailile pinde, mille kontsentratsioon väheneb kaugenemisel pinnakihist. [1, 2]

Nitriitimise puhul rikastatakse terase pinnakihti kõvaduse, kulumis- ja korrosioonikindluse tõstmiseks lämmastikuga. Lisatav lämmastik võib olla kas gaasilisel või vedelal kujul. Gaasnitriitimine toimub ammoniaagis temperatuuril 500–600°C, mille tulemusena difundeerub tekkiv monolämmastik terasesse. Nitriitimist loetakse üheks viimaseks termotöötamise etapiks, millele ei tohiks järgneda ühtegi mehhaanilise töötamise etappi. Selle protsessi eeliseks on see, et puudub martensiitmuutus ning sellega seotud jääkpinged. Lisaks on tagatud detailide suurem vastupanu väsimusele. Nitriitmise puuduseks on eelkõige kõrge maksumus, sest protsess on ajaliselt väga pikk. Vedelnitriitimist teostatakse naatrium- ja kaaliumtsüaniide sisaldavates sulasoolades ning protsessi efekt on sama kui gaasilise nitriitimise puhul. [1]

## **1.3. Tsüaanimine ja nitrotsementiitmine**

Kui terase pinnakihti rikastatakse ühtaegu nii süsiniku kui lämmastikuga, siis nimetatakse seda gaasilises keskkonnas toimuvat protsessi nitrotsementiitimiseks ning tahkes ja vedelas keskkonnas toimuvat protsessi tsüaanimiseks. Gaasnitrotsementiitimise protsess viiakse läbi süsinikku ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) ja lämmastikku ( $\text{NH}_3$ ) sisaldavate gaaside segus, kus kõrgemal temperatuuril toimub rikastamine süsinikuga ning madalamal lämmastikuga. Nitrotsementiitimine sobib eelkõige keskmise süsinikusisaldusega mittelegeerterastele, mille südamikule on esitatud täpsemad nõuded. [1, 2]

Tsüaanimise puhul toimub protsess pastadega, mille komponentideks sobivad näiteks peenestatud turbakoks, baariumkarbonaat ja ferrokroom. Detailid kaetakse 3–4 mm paksuse pastakihi, asetatakse tsüaanimiseks mõeldud kasti ja kuumutatakse temperatuurini 920–930°C. Kuni 2 tunniga on võimalik saada 1,0–1.5 mm paksune tsüaanitud pinnakiht. [2]

Võrreldes tsementiitimisega on tsüaanimine lühiajalisem protsess, lisaks on väiksemad detailide deformatsioonid ja kaardumised. Antud protsess eeldab ka järgnevat karastamist

ning seda on kasulikum kasutada väikeste mõõtudega detailide puhul, millel on vaja saavutada õhem kui 0,5 mm paksune pinne. Antud protsessiga suureneb ka detailide korrosioonikindlus ja väsimustugevus. Protsessi suurimaks miinuseks on see, et tsüaniidi soolad on mürgised ning neid kasutades tuleb täpselt järgida ohutusnõudeid. [1, 2]

#### **1.4. Sulfotsüaanimine**

Hõõrdeteguri vähendamiseks tuleb tõsta terasest ja malmist detailide kulumiskindlust rikastades pinnakihti väävliga. Kõige suurem efekt on aga saavutatav juhul kui pinda rikastatakse samal ajal veel ka lämmastiku ja süsinikuga, s.t sulfotsüaanitakse. Tööstuses kasutatakse antud protsessi läbiviimiseks sulasoolavanne, kus temperatuur on 540–570°C. Sel viisil on 2,5–3 tunniga saavutatav 0,3 mm paksune pinne. [2]

Sulfotsüaanida saab ka tahkes segus, mis koosneb peenestatud raud(II)sulfiidist, kollasest veresoolast ja karbonisaatorist, millele on lisatud baariumkarbonaati. Antud segu on korduvkasutatav. Detailid pakitakse sarnaselt tsementiitimisele kasti sisse ning kuumutatakse 6–10 tundi ahjus 560–570°C juures. [3]

#### **1.5. Pinnakihi rikastamine metallidega**

Pinnakihi rikastamiseks kasutatakse kroomi, alumiiniumi või vanaadiumi, mis lisatakse sarnaselt teistele termokeemilistele protsessidele tahkes, vedelas või gaasilises keskkonnas. Saadud pinded on tunduvalt õhemad kui tsementiitimisel saadavad, kuid protsess on aeganõudvam ning väikesest difusioonkiirusest tingituna on vajalik ka kõrgem temperatuur. Pinnakihi rikastamine on töömahukas ja kõrge maksumusega protsess, mida kasutatakse eelkõige defitsiitsemate legerivate elementide (Cr, Ni, Co, W) kokkuhoiu eesmärgil. [1]

#### **1.6. Tsementiitimine**

Laialt kasutatavaks termokeemilise töötlemise meetodiks on tsementiitimine, mille kasutus- ja rakendusomadusi käsitleb ka käesolev bakalaureusetöö. Antud meetodit kasutatakse näiteks väikese süsinikusisaldusega (0,05–0,35%) leger- või süsinikteraste puhul, mille puhul karastamine ei anna soovitud tulemust. Sellisel juhul tuleb detaili pinnakihi teostada süsinikrikastus e. karbonisatsioon koos järgneva karastamisega, mida kokkuvõtvalt nimetatakse tsementiitimiseks. Lisatav süsinik võib olla tahkel, vedelal või gaasilisel kujul. Töödeldavateks detailideks võivad olla näiteks kolvisõrmed, võllid, hammasrattad, puksid



jt. detailid, mille puhul on tähtis saavutada pinnakihi kõvadus, tugevus, kulumiskindlus ja väsimustugevus. [1, 2]

Protsess saab alguse detailide puhastamisega õlist, roostest ja mustusest. Seejärel kaetakse vaabaga kinni need detaili pinnad, millele pole vaja tsementiitimist teostada. Vaapadena sobivad kasutamiseks tabelis 1.1. välja toodud segud, mis kantakse pintsliga detaili pinnale 2–3 mm paksuse kihina ning kuivatatakse seejärel õhus. Selleks, et vaapa oleks pärast protsessi lihtsam eemaldada, kaetakse detail eelnevalt galvaaniliselt sadestatud vasekihiga. Detaili avad ja õõnsused, mis ei vaja tsementiitimist, täidetakse kas liiva ja tagi seguga või samottpulbri ja tagi seguga. Segu pressitakse kinni ja avade otsad suletakse korkidega. [3]

**Tabel 1.1.** Tsementiitimisel kasutatavad kattevaabad [3]

Komponendid	Koostised massiprotsentides		
	I	II	III
Savi	43	40	-
Liiv	41	45	-
Talk ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ )	-	-	58
Booraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	10	12	-
Naatriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ )	3	-	-
Naatriumnitriid ( $\text{Na}_3\text{N}$ )	-	3	-
Alumiiniumoksiid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	-	-	28
Pliioksiid ( $\text{PbO}_2$ )	3	-	-
Pliimennik ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )	-	-	14

Pärast avade täitmist ja pindade katmist asetatakse detailid malm- või teraskasti, mille põhja on puistatud 20–30 mm paksune kiht karbonisaatorit. Umbes sama vahekaugus peaks jääma ka kasti asetatud detailide vahele. Tsementiitimissügavuse ja kvaliteedi kontrollimiseks võib kasti püstiselt asetada 2 terasvarrast läbimõõduga 8–10 mm, mis ulatuvad välja kasti kaanes olevatest avadest. Seejärel kaetakse savi ja asbesti segu või liivaga kõik kasti ja kaane vahelised pilud, et tagada kasti õhutihedus. [3]

Tsementiitimise puhul on levinuimaks karbonisaatoriks puusüsi koos aktivisaatoritega, mis rauaga kontaktis olles laguneb ning ühe produktina tekib monosüsinik, mis moodustab detailile kaitsva pinde. Karbonisaator võib sisaldada ka muid lisaaineid, näiteks baariumkarbonaati. Enamkasutatavate karbonisaatorite koostised on välja toodud tabelis 1.2. Karbonisaator segatakse kokku 25–30% värskest ja 70–75% töötanud segust ning selle niiskusesisaldus ei tohi olla üle 5–6%. [3]

**Tabel 1.2.** Tahkete karbonisaatorite koostised [3]

Komponendid	Koostised massiprotsentides						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Kasepuusüsi	90	90	80–85	70	74–76	40–65	-
Baariumkarbonaat ( $\text{BaCO}_3$ )	10	-	5–8	20	12–15	10–15	10–15
Sooda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	-	10	10–12	7	1–1,5	-	-
Kriit ( $\text{CaCO}_3$ )	-	-	-	-	3–5	-	3–4
Masuut ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ )	-	-	-	3	4,5–5	-	-
Kivisöekoks	-	-	-	-	-	20–45	81–87

Tahkesüsinikrikastamisel moodustub temperatuuridel 900–950°C ebapüsiv süsinikoksiid CO, mis rauaga kontaktis olles laguneb reaktsiooni 1.1. järgi. Selle tulemusena tekib monosüsinik, mis adsorbeerub ehk seondub pinnakihiga. [1]



Detailid asetatakse kastiga ahju ja kuumutatakse karbonisaatoris temperatuurini 900–950°C. Mida väiksem on töödeldava detaili süsinikusisaldus, seda kõrgem peab olema temperatuur. Lõpptemperatuuril seisutamise aeg valitakse vajaliku tsementiitimissügavuse järgi: ühe tunniga tsementiidatakse 0,15 mm paksune pinnakiht. Katsevarda katkimurdmise abil saab kontrollida kihi tegelikku paksust ning vajaduse korral saab kuumutusaega korrigeerida. Masinaehituslike detailide pinnakiht rikastatakse üldjuhul 0,5–2,0 mm sügavuselt süsinikuga. [3]

Pärast seisutusaega jahutatakse detailid koos kastiga õhus, määratakse testvarda abil lõplik tsementiiditud kihi paksus, puhastatakse detailid ja viiakse läbi termotöötlemine. Termiline töötlus on vajalik jämedateralise struktuuri ja rabaduse likvideerimiseks. Esmalt detailid normaliseeritakse, seejärel karastatakse ja madalnoolutatakse. Normaliseerimise puhul kuumutatakse detailid ligi 50°C üle austeniitse struktuuri faasipiiri, seisutatakse sellel temperatuuril ja jahutatakse õhus, et saada väiksemad sisepinged ja peeneteralisem struktuur. Karastamise käigus püütakse saavutada ebastabiilne, aga kõva martensiitstruktuur. Tsementiiditavaid süsinikteraseid karastatakse vees ning legeerteraseid õlis. Jääkausteniidi vähendamiseks ja sisepingete kaotamiseks noolutatakse detaile temperatuuril 150–200°C ja jahutatakse õhus, et muuta karastatud detail löökkoomustele vastupidavamaks. Saadav pinnakõvadus võib jääda vahemikku 57–62 HRC, südamikul aga 25–35 HRC (legeerterased) ja kuni 20 HRC (mittelegeerterased). [1, 3]

Tsementiitimist saab teostada ka vedelsüsinikrikastamise meetodil teostatades protsessi sulades tsüaanisoolades ( $\text{NaCN}$ ), mille lagunemisel tekib dispersne grafiit. Kui sulasooladele lisada süsihappesoolasid, siis protsessi lõpp-produktina sadestub detaili pinnale monosüsinik. Samuti saab protsessi läbi viia pastakujuliste karbonisaatoritega, kus põhikomponentideks on tahm ja sooda. Pastade koostised on esitatud tabelis 1.3. Pasta valmistamiseks segatakse tahked komponendid õli või masuudiga, et saada poolvedel mass. [3]

**Tabel 1.3.** Tsementiitimispastade koostised [3]

Komponendid	Koostised massiprotsentides			
	I	II	III	IV
Tahm	28	30	30	30
Sooda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	3,5	10	20	10
Dekstriin ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ )	-	20	10	20
Punane veresool $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	1,5	-	-	-
Hüdroõli	67	-	-	-
Mootoriõli	-	40	-	-
Masuut ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ )	-	-	40	40

Saadud pasta kantakse kõva pintsli abil või sissekastmise teel eelnevalt ettevalmistatud detaili pinnale. Seejärel detailid kuivatatakse, laotakse teraskasti, suletakse tihedalt ja asetatakse temperatuurini  $930\text{--}950^\circ\text{C}$  kuumutatud ahju. Pastade eeliseks on suurem tootlikkus: 1 mm sügavune 1,0–1,2% süsinikusisaldusega kiht on saavutatav umbes 3 tunniga. Antud meetodi puuduseks on aga tsementiititud kihi paksuse ja süsinikusisalduse suur varieeruvus [3]. Gaassüsinikrikastamise protsess on lihtsa mehhaniseerimise tõttu masinatööstuses laialt kasutatav. Kandegaasi (propaani  $\text{C}_3\text{H}_8$  või maagaasi  $\text{CH}_4$ ) põlemisel tekkiva süsinikoksiidi ja selle lagunemisel saadava monosüsiniku osakesed rikastavad detaili pinnakihi süsinikuga. Antud protsess on eriti levinud hammasrataste tootmisel, kus on tähtis saavutada ühtlane rikastatud kihi paksus kogu detaili pinnakihi ulatuses. Protsessi viiakse läbi vaakumahjus temperatuuril  $930\text{--}950^\circ\text{C}$  ning rõhul 0,2–0,3 bar. USA tootja Seco Vacuum Technologies vaakumahi on kujutatud joonisel 1.1. [5, 6]



**Joonis 1.1.** Seco Vacuum Technologies vaakumahi Vector [4]

Karbonisaatorina sobivad kasutamiseks atsetüleen ( $C_2H_2$ ) ja etüleen ( $C_2H_4$ ), mis viiakse vedelale kujule ning pihustatakse ahju vaakumkeskkonda. Erinevalt näiteks metaanist ja propaanist on nende ainete keemilised sidemed nõrgemad ning nende lõhkumiseks on vaja madalamat temperatuuri. Tekkiv monosüsinik sadestub detailide pinnale ning moodustab kõva rikastatud kihi. Erinevalt tavalisest tahke karbonisaatoriga rikastamisest on protsess kiirem—1 mm paksune rikastatud kiht on saavutatav 30-50 minutiga ning kasti pole vaja eraldi kuumutada. Lisaks pole vaja detaile peale protsessi puhastada ning ka protsessi üldine energiakulu on lühema seisutusaja tõttu väiksem. [5, 6]

Tsementiitumise eesmärk saavutada kõva ja kulumiskindla pinnaga detailid omab eriti suurt rolli erinevate hammasrataste ning teiste jõuülekanne mehhanismide detailide valmistamisel. Selliste elementide purunemise põhiliseks põhjuseks on pinnakahjustustest alguses saanud mikropraod. Sellistest pragudest saavad pingekontsentraatorid ning avalduvate jõudude tulemusena hakkab pragu kasvama lõppedes hammasratta purunemisega. Tsementiiditud pinnas aga annab lisatud süsinik detaili pinnale suure kõvaduse ning seetõttu on takistatud nii mikropragude kui ka detailide omavahelisest hõõrdumisest tulenevate pinnakahjustuste tekkimine. [7]

## 1.7. Teras pindtugevdamine tööstuses

Teraste pindtugevus ja õige materjalivalik omavad eriti suurt rolli erinevate võllide, hammasrataste ja teise masinaelementide tootmisel, mis peavad olema suure kulumiskindlusega ja vastupidavad muutuvatele koormustele. Matthew Jaster on e-ajakirjas Gear Technology kirjeldanud laevanduses ja energeetikas kasutatavate suurte hammasrataste tootmist ning rõhutab, et suuri koormusi taluvate masinate projekteerimise juures on esmatähtis just termiline ja termokeemiline töötlemine, mis annavad detailidele vastavad omadused. Kuna selliste hammasrataste tootmine toimub üksiktootmisena, siis on ülioluline saavutada detaili soovitud parameetrid kohe esimesel katsel, et vältida lõpptoote mittevastavust kliendi nõudmistele. Kaevanduses kasutatavat 3,2 m läbimõõduga hammasratast on kujutatud joonisel 1.2. [8]



**Joonis 1.2.** USA ettevõtte L&H Welding & Supply poolt toodetud 3,2 m läbimõõduga kaevandusseadme hammasratas [9]

Tsementiitimine annab hammasratastele suure pinnakõvaduse ning sellega on tagatud hammaste maksimaalne väsimuskindlus. Nitriitimine tagab lisaks väsimuskindlusele ka korrosioonikindluse ning väiksemad kujuhälbed. Pindkarastusega on saavutatavad samad omadused, kuid protsessiks kuluv aeg on tavaliselt lühem kui tsementiitimisel või nitriitimisel. Mehaaniliste omaduste kõrval on oluliseks väljakutseks ka minimaalsete

kujuhälvete saavutamine. Iga tootmisprotsess ning termilise töötlemise võte mõjutab detaili mõõtmeid ning seega on oluline, et kliendini jõuaks toode, mis vastaks kehtestatud kvaliteedinõuetele. Kui üldjuhul järgneb mehaanilisele töötlemisele termotöötlus, siis vastutusrikaste ja kalliste detailide tootmisel on kasutatav ka variant, kus termilisele töötlemisele järgneb täiendav mehaaniline töötlemine, et eemaldada kujuhälbed ning anda detailile vastavalt tolerantsidele sobivad mõõtmed. Sellisel moel küll eemaldatakse osa tugevdatud pinnast, kuid piisavalt sügavalt rikastatud pinna puhul pole kao suurus selline, mis mõjutaks detaili kasutusomadusi. Lisaks saab juba detaili projekteerimisel arvestada täiendava lõiketöötusega ning sel moel on võimalik ka kogu tootmisprotsessi paremini juhtida. Seetõttu on tähtis ettevõttesisene kommunikatsioon tootmistöötajate ning konstruktorite vahel, et näha tootmises tekkivaid kõrvalekaldeid ning minimaliseerida nende mõju lõpptoota kvaliteedile. [8]

Antud bakalaureusetöö käigus tutvuti AS Hanza Mechanics Tartu termotöötlemise osakonnaga, et anda ülevaade sellest, kuidas viiakse tööstuses läbi tsementiitimist. Antud ettevõtte on Lõuna-Eestis üks ainukesi kohti, kus tegeletakse veel metallide termotöötlemisega. Kogu tänapäeva tööstuse läbiv põhimõte on see, et vastavalt detaili elueale ja kasutusvaldkonnale valitakse välja sobiv toormaterjal, millest see valmistada. Materjalide laia valiku ja iga tööoperatsiooni täiendava maksumuse tõttu on termotöötlemise valdkond jõudnud seisu, kus vaid vähesed detailid läbivad täiendava termotöötlemise. Analoogselt on ka AS Hanza Mechanics Tartus, kus termotöötlemist teostatakse ca 50-le erinevale tooteartiklile. Väikse töömahu tõttu töötab termika osakonnas vaid üks tööline, kellel on ligi 40-aastane kogemus metallide termotöötlemise valdkonnas. Seejuures teostatakse kõiki tuntumaid termotöötlemise protsesse: karastamist, lõõmutamist, normaliseerimist ja tsementiitimist.

Tsementiitimise protsessi viidi läbi umbes  $5\text{ cm}^2$  suurustele terasdetailidele, mille kasutusvaldkonnast tulenevalt oli vajalik saavutada kulumiskindel pinnakate. Protsessi läbiviimiseks asetati detailid kihtidena roostevabast terasest kasti vaheldumisi karbonisaatoriga, milleks oli kasepuusüsi. Viimaseks kihiks jäeti karbonisaator. Seejärel asetati kastile kaas ning kasti ja kaane vahele jäänud tühimik täideti liivaga. Joonisel 1.3. kujutatud kast lükati eelnevalt sisse lülitatud kuumutusahju temperatuuril  $910^{\circ}\text{C}$ . Kuna detailide seisutusaeg moodustab harilikult tööpäevast küllaltki suure osa, siis on töötajal võimalus tegeleda teiste detailide ettevalmistamisega või mõne muu tööoperatsiooniga.



**Joonis 1.3.** AS Hanza Mechanics Tartu termika osakonna tsementiitumise kast

Protsessi seisutusaeg ja kuumutustemperatuur valitakse samade reeglite alusel, mis on välja toodud eelmises alajaotises. Antud detaili puhul oli operatsioonikaardi järgi seisutusajaks määratud 4 tundi. Ühe tsementiitumise kasti eluiga on umbes 1 aasta, sest pidevate kuumutusprotsesside tõttu kasti seinad deformeeruvad liigselt ning see muudab lõpuks raskeks kasti õhutiheda sulgemise.

Pärast 4 tunni möödumist avati ahi ning tõmmati kast spetsiaalsele tõstelauale jahtuma. Üldjuhul jäetakse detailid koos kastiga vahetuse lõppedes jahtuma ning alles järgmine päev avatakse kast. Esmase süsinikuga rikastatud kihi paksuse määramise teostab osakonna meister, kes mõõdab detaili pinnakõvadust Rockwelli skaalal. Sel viisil mõõdetuna peaks detaili pinnakõvadus olema vahemikus 45–55 HRC. Olenevalt tööjuhendist tuleb mõne detaili puhul teostada murdekatsed ning inspekteerida murdepinna profiili. Vajadusel teostab täiendava tsementiitumise kihi paksuse määramise kvaliteeditehnik.

Pärast kontrolli sõelutakse detailidest välja söe jäägid ning järgneb termotöötlemine, mis on vajalik jämedateralise struktuuri ja rabaduse likvideerimiseks. Esmalt detailid normaliseeritakse, seejärel karastatakse ja vajadusel noolutatakse. Tsementiitumise teraseid karastatakse 10%-lises NaOH vesilahuses, sest vees lahustunud soolad ja leelised suurendavad tunduvalt vee jahutusvõimet (temperatuuripiirkonnas 650–550°C ligi 2 korda). Legeerteraste karastuskeskkonnaks on õli. Saadav lõplik pinnakõvadus peaks jääma vahemikku 57–62 HRC. Viimase tööoperatsioonina puhastatakse detailid ultrahelivannis.



## **2. MATERJAL JA METOODIKA**

### **2.1. Kasti projekteerimine ja valmistamine**

Koostatava laboratoorse töö läbiviimiseks on vaja projekteerida tsementiitimiseks sobilik kast, määrata protsessi parameetrid ja koostada labortöö blankett. Lisaks tuleb lähtuvalt uue labortöö riskifaktoritest täiendada laboratoorsete tööde ohutuseeskirja.

Esimeseks labortöö ettevalmistamise etapiks oli projekteerida kast, mille sees saaks tsementiitimise protsessi läbi viia. Eeskujuks võeti AS Hanza Mechanics Tartu termika osakonnas kasutusel olnud kastid. Kasti piirmõõtmed määras Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi materjalitehnika laboris olev ahi, millega plaaniti protsessi läbi viia. Tulenevalt ahju kuumakambri suuruselt pidid kasti mõõdud jääma järgmistesse piiridesse: pikkus 260 mm, laius 250 mm, kõrgus 140 mm.

Projekteerimisel lähtuti sellest, et tööoperatsioonide maht kasti valmistamisel oleks võimalikult väike. Kast ja kasti kaas valmistati 3 mm lehtmaterjalist S235JR, kaane sangad ja kaane hoidikud 20x20x3 mm nurkprofiilist S235JR. Kasti mugavamaks ahju sisestamiseks ja väljavõtmiseks projekteeriti kasti külgedele 30x30x3 mm S235JR nurkprofiilist kinnitused, mille taha saab haakida spetsiaalse roobi. Kasti kaane ja kasti külgede vahele jäeti 4 mm laiune pilu, mis tuleb täiendava hermeetilisuse tagamiseks täita kas liiva või saviga. Projekteerimisel kasutati joonestustarkvara SolidWorks.

Kasti detailid telliti Powersteel OÜ-st, kus konstruktor valmistas etteantud jooniste põhjal ette plasmalõikuse jaoks DXF-failid. DXF faili (Drawing Exchange Format) näol on tegemist vektor pildifailiga, mida kasutatakse raalprojekteerimise programmides. Antud formaat töötati välja tarkvara arendaja Autodesk poolt ning see loodi selleks, et viia AutoCAD'i dokumente paremini kooskõlla teiste programmidega [10]. Plasmalõikuspingsil valmistati kasti ja kasti kaane toorikud ning sellele järgnes detailide painutamine painutuspingil. Nurkprofiilist detailid lõigati valmis lintsael. Pärast kõikide detailide valmistamist keevitati need töö autori poolt kokku vastavalt töö lisades olevale koostejoonisele. Kasti maksimaalse hermeetilisuse tagamiseks teostati keevisõmblustele veega lekketest. Puudulike või poorsete keevisõmbluste puhul parandati need ülekeevitusega. Viimase tööoperatsioonina lihviti üle keevisõmblused ja eemaldati keevituspritsmed. Projekteeritud ja valmistatud kasti lõpptulemus on kujutatud joonisel 2.1.





**Joonis 2.1.** Tsementiitimise kast ja kaas valmiskujul [12]

Kasti mugavamaks ahju sisestamiseks ja väljavõtmiseks valmistati spetsiaalne roop, mis kinnitub kasti pikematel külgedel olevate nurkprofiilide taha. Roop on kaetud kuumakindla musta värviga. Käesolevas peatükis kirjeldatuga täideti teine antud töö ülesanne ehk projekteerida ja valmistada tsementiitimise protsessi jaoks vajalik kast. Tsementiitimise kasti ja tõsteroobi tehnilised joonised on lisatud käesoleva töö lisadesse.

## 2.2. Parameetrid tsementiitimiseks ja protsessi läbiviimine

Tsementiitimise protsessi läbiviimiseks tehnikainstituudi termika laboris tuli määrata protsessi parameetrid, mis valiti tuginedes kirjanduses välja toodud andmetele. Protsessi parameetrid on koondatud tabelisse 2.1. Tingimused valiti kasutatud kirjanduse alusel selliselt, et pärast protsessi oleks tsementiititud pinnakihi sügavus 1 mm. Antud sügavust hinnati piisavaks seetõttu, et iga täiendava termotötluse protsessi käigus põleb detaili pinnakihist välja süsinikku ning et struktuuripiltidel oleksid selgesti eristatavad detaili pinnakiht ja südamik.

**Tabel 2.1.** Tsementiitimise protsessi parameetrid kasutamiseks tehnikainstituudi termika laboris

Parameeter	Väärtus
Seisutusaeg, h	6,7
Kuumutustemperatuur, °C	950
Karbonisaatori kogus, kg	0,75

Karbonisaatorina kasutati kasepuusöe ja baariumkarbonaadi segu, mille täpne keemiline koostis on välja toodud tabelis 2.2. Sama koostisega karbonisaatorit kasutatakse ka Hanza Mechanics Tartu AS termika osakonnas. Karbonisaatori koguseks määrati 0,75 kg ning sellest piisas, et 3 katsekeha täielikult materjaliga ümbritseda.

**Tabel 2.2.** Tsementiitimiseks kasutatava karbonisaatori koostis [11]

Komponent	Sisaldus massiprotsentides, %
Süsi	66,76
BaCO <sub>3</sub>	20
CaCO <sub>3</sub>	2
H <sub>2</sub> O	4
S	0,04
Lenduvad peenosakesed	7
SiO <sub>2</sub>	0,2

Karbonisaatori põhikoostisosaks on kasepuusüsi, millest eralduv monosüsinik ladestub detailide pinnale. Lisaks baariumi ja kaltsiumi sooladele sisaldub karbonisaatoris ka märkimisväärselt peenosakesi ehk tolmu.

Katsekehade materjaliks valiti teras S355J2, mille süsinikusisaldus standardi DIN EN 10025 järgi on 0,16%. Katsekehade materjali täpsem keemiline koostis on välja toodud tabelis 2.3.

**Tabel 2.3.** Katsekehade materjali S355J2 keemiline koostis [12]

Keemiline element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Sisaldus, %	0,16	0,30	1,34	0,019	0,010	0,07	0,11	0,23
Keemiline element	Al	Ti	Nb	B	Sn	Ca	Mo	V
Sisaldus, %	0,029	0,002	0,002	0,0001	0,009	0,0018	0,01	0,005

Materjali valikul osutus tähtsaks selle süsinikusisaldus, mis pidi jääma kindlasti alla 0,2%. Sel juhul on tagatud protsessi efekt ehk muust struktuurist selgelt eristatav süsinikuga rikastatud kiht. Suurema süsinikusisaldusega materjalide pindtugevdamiseks tuleks kasutada teisi termokeemilise töötlemise meetodeid.

Katsekehad valmistati ümarprofiilist läbimõõduga 20 mm ning pikkusega 60 mm. Kõik detailid markeeriti salkudega, mis viiliti katsekeha servale. Salkude arv oli vastavuses detaili numbriga. Tsementiitimine teostati kokku viiele katsekehale: esimese katseseeria moodustas kolm katsekeha ning teise ja kolmanda katseseeria moodustasid eraldi üks katsekeha. Teine ja kolmas katseseeria olid mõeldud tulemuste ning protsessi parameetrite kontrollimiseks.

Tsementiitimise kasti põhja kallati umbes 20 mm paksune kiht karbonisaatorit. Esimese katseseeria tarvis asetati kasti ühtlaste vahedega kolm katsekeha. Detailide asetus kastis on kujutatud joonisel 2.2. Ülejäänud kogus karbonisaatorit kallati detailide peale. Seejärel asetati kastile peale kaas ning suleti liivaga kasti ja kaane vaheline pilu.



**Joonis 2.2.** Katsekehade asetus tsementiitimise kastis

Protsessi läbiviimiseks valiti tehnikainstituudi termika laboris olev Naberthermi programmeeritav kuumutusahi N7/H. Antud ahju sisemõõtmetest lähtuvalt valmistati ka tsementiitimiseks vajalik kast. Pärast kasti asetamist ahju sisse määrati programmis ära protsessi parameetrid ja kulg: ahi soojeneb 950°C -ni nii kiiresti kui võimalik ning hoiab seda temperatuuri 6 tundi ja 50 minutit. Seejärel lülitab ahi toite välja ning algab jahtumine. Pärast ahju väljalülitumist tuleb tsementiitimise kast koos detailidega ahjust eemaldada ning lasta sel jahtuda õhus. Selleks, et vältida söe kuumutamisel eralduvate põlemisgaaside sattumist laboriruumi keskkonda, paigutati kuumutusahi tõmbekappi. Lisaks tõmbekapile lülitati sisse sissepuhe, et kompenseerida tõmbekapi väljatõmmet. Kuna tsementiitimise puhul on tegemist küllaltki pikaajalise protsessiga, siis käivitati ahi tööpäeva alguses kell 8, et oleks võimalik teostada protsess tavapäraste töötundide jooksul.

Tsementiitimisele järgnes katsekehade termiline töötlemine. Vastavatele katsekehadele teostatud termilise töötlemise operatsioonid on välja toodud tabelis 2.4. Kokku viidi läbi 3 erinevat termotöötlemist, mille ülesanne oli detailide struktuuriomaduste parandamine. Kontrollseeria katsekehadele viidi läbi kõik ette nähtud termilise töötlemise operatsioonid.

**Tabel 2.4.** Vastavatele katsekehadele teostatud termilise töötlemise operatsioonid

Operatsioon	KK0	KK1	KK2	KK3	KK4	KK5
Tsementiitimine		x	x	x	x	x
Normaliseerimine			x	x	x	x
Karastamine				x	x	x
Madalnoolutamine				x	x	x

Lähtuvalt kirjanduse ülevaates välja toodud faktidest valiti termilise töötlemise viisideks normaliseerimine, karastamine ja madalnoolutamine. Antud protsesside parameetrid on välja toodud tabelis 2.5. Parameetrite määramisel lähtuti ka tehnikainstituudi termika labori võimalustest, et garanteerida võimalikult hea protsesside lõpptulemus.

**Tabel 2.5.** Tsementiitimisele järgneva termilise töötlemise protsesside parameetrid

Parameeter	Väärtus
Normaliseerimise temperatuur, °C	920
Normaliseerimise seisutusaeg, min	17
Normaliseerimise jahutuskeskkond	Seisvas õhus toatemperatuurini
Karastamise temperatuur, °C	910
Karastamise seisutusaeg, min	17
Karastuskeskkond	Vesi
Madalnoolutamise temperatuur, °C	200
Madalnoolutamise seisutusaeg, min	60
Madalnoolutamise jahutuskeskkond	Seisvas õhus toatemperatuurini

Termilist töötlemist teostati samuti tehnikainstituudi termika laboris olevates ahjudes. Protsesside temperatuurid valiti raua-süsiniku faasidiagrammilt lähtuvalt kirjanduses välja toodud nõuannetest. Normaliseerimise ja karastamise seisutusaegad valiti lähtuvalt reeglist, mille kohaselt 1 mm materjali ristlõike läbimõõdu kohta peab olema kuumutuskestus 50 sekundit [1].

Normaliseerimist kasutatakse teraste lõiketöödeldavuse parandamiseks ning see protsess eelneb sageli karastamisele. Normaliseerimise põhieesmärgiks on saavutada terase peeneteralisem struktuur. Mida peenem on struktuur, seda suuremad on materjali sitkus, tugevus ja kõvadus [1]. Antud muutuse kontrollimiseks mõõdeti nii tsementiiditud kui ka normaliseeritud katsekeha struktuuripildil ära kümne perliiditera joonmõõde horisontaal- ja vertikaalsihis. Antud mõõtmised teostati katsekeha servast 0,2 mm kaugusel. Kasutades valemit 2.1. leiti ühe tera joonmõõtmete aritmeetiline keskmine  $I_k$  vastaval katsekehal [13].

$$I_k = \frac{I_{hor} + I_{ver}}{2 \cdot 10} \quad (2.1.)$$

kus  $I_{hor}$  on joonmõõde horisontaalsuunas  $\mu\text{m}$ ;

$I_{ver}$  – joonmõõde vertikaalsuunas  $\mu\text{m}$ .

Järgnevalt tuli võtta ühe tera keskmine joonmõõde  $I_k$  tera keskmiseks diameetriks ja leida tera keskmine pindala  $S$  valemiga 2.2. [13].

$$S = \frac{3,14 \cdot I_k^2}{4} \quad (2.2.)$$

Saadud tulemuste põhjal tuli määrata tabeli 2.6. abil tera number. Antud tunnusnumber iseloomustab erinevate struktuuriosade terade suurust ning loob ühise aluse nende omavaheliseks võrdlemiseks.

**Tabel 2.6.** Tera numbri määramine ühe tera pindala alusel [13]

Tera number	Tera pindala $\mu\text{m}^2$	Tera number	Tera pindala $\mu\text{m}^2$
1	64000-32000	5	4000-2000
2	32000-16000	6	2000-1000
3	16000-8000	7	1000-500
4	8000-4000	8	<500

Normaliseerimise ja karastamise vahepeal hoiti detaile töölaual spetsiaalsel alusel, et oleks tagatud nende ühtlane jahtumine. Terasel kiirel jahutamisel ehk karastamisel on võimalik vältida austeniidi lagunemist ning selle tulemusena muutub austeniit süsinikuga üleküllastunud ferriidiks ehk martensiidiks, mis on saavutatav terase karastamisega. Austeniidi lagunemine eeldab süsiniku difusiooni ning seega saab see protsess toimuda ainult väga kõrgetel temperatuuridel ja kindla ajavahemiku jooksul. Terasel kiirel jahutamisel näiteks vees või õlis difusiooniprotsessid ei toimu ning peatub ka austeniidi lagunemine. Tulemuseks on martensiitmuutus, mille käigus austeniit jääb metastabiilsena püsivaks. Martensiitstruktuuriga teras on kõva ning kõvaduse väärtus suureneb terase süsiniku sisalduse kasvades [1]. Karastuskeskkonnaks valiti vesi, sest sel juhul on antud süsinikterase margi puhul tagatud martensiitse struktuuri teke ning seega saavutatav vajalik pinnakõvadus.

Terasel karastamisel saavutatakse suur struktuuri kõvadus, mis on ka protsessi eesmärk.

Karastatud detailid aga omavad väikest vastupanu löökoormusele ja deformatsioonidele, sest terase jahtumisel tekivad termopinged ja martensiidi tekkimisel lisanduvad faasipinged. Neid omadusi saab parandada noolutamise, mille tulemusena moodustub struktuuris noolutusmartensiit [1]. Madalnoolutamist teostati temperatuuril  $200^\circ\text{C}$  kestusega 60 min

ning selle tulemusena muutus detaili pind kollakaks, mis annab tunnistust sellest, et protsessi kuumutustemperatuur oli valitud õigesti.

Nii erinevate termotöötluste operatsioonide vahepeal kui ka pärast protsesse hoiustati erinevaid katsekehi eraldi karpides hermeetilise kilekoti sees. Lisaks olid katsekehad markeeritud sälkudega. Sel moel oli välistatud katsekehade segamini ajamine. Käesoleva peatükiga täideti antud bakalaureusetööle seatud eesmärk viia praktikas läbi tsementiitimine koos täiendava termotöötlustega. Katsetulemuste täpsem analüüs ja kokkuvõte on välja toodud kolmandas põhijaotises.

### **2.3. Katsekehade ettevalmistamine tulemuste analüüsiks**

Esimese etapina lõigati kõikidest katsekehadest proovitükk, mille lõikepinnalt saaks vaadelda südamiku ja pinnakihi struktuuri erinevusi. Lõikamiseks kasutati abrasiivkettaga saagi AbrasiMet 250, mis on kujutatud joonisel 2.3. Tööks valiti lõikeketas, millega tohib lõigata suurema kõvadusega kui 55 HRC materjale.



**Joonis 2.3.** Abrasiivkettassaag AbrasiMet 250



Pärast katsekehade lõikust hakati teostama lihvimist ja poleerimist, mille tulemusena omandasid katsekehade proovtükid poleerpinna. Söövitatud poleerpind on vajalik nii mikroskoobi all struktuuri vaatlemiseks kui ka Vickersi meetodil pinna kõvaduse mõõtmiseks. Lihvimist ja poleerimist teostati seadmel EcoMet 300, mis on kujutatud joonisel 2.4.



**Joonis 2.4.** Lihvimis- ja poleerimisseade EcoMet 300

Antud seadmel on võimalik teostada ka automaatset lihvimist, kuid antud katsekehade ettevalmistuse käigus teostati töid käsitsi koos voolava veega. Lihvimist alustati P240 paberiga, jätkati P360 paberiga ning lõpetati P800 lihvpaberiga. Poleerimiseks kasutati sama seadet koos poleerketaste ja poleerimise suspensioonidega, kus abrasiivosakeste suurus oli 6, 3, 1 ja 0,05  $\mu\text{m}$ .

Katsekehade poleerimise suund valiti risti eelmise etapi suunaga, et eemaldada katsekeha pinnalt võimalikult palju kriime. Kui töö tulemuse kontrollimisel ilmnas, et poleeritud pinnal esineb kriime, siis pesti ketas voolava vee all puhtaks ning teostati poleerimine uuesti. Peale viimast poleerimise etappi puhastati katsekehade pinnad etanooliga.

Terasest katsekehade struktuuri nägemiseks mikroskoobi all on vaja detailide pinda eelnevalt söövitada, et tuua välja pinna tegelikud omadused. Söövitamiseks kasutati söövituslahust Nital, mis sisaldab 2% kontsentreeritud lämmastikhapet ning 98% etanooli. Antud lahus on

sobiv just madala süsinikusisaldusega teraste pinnaproovide söövitamiseks, sest see suudab eristatavalt välja tuua ferriidi terad [14]. Söövituslahus valmistati Petri tassi sisse ning katsekeha poleerpinda hoiti 7 sekundit lahuse sees. Peale söövitamist puhastati pind etanooliga ning kuivatati vatitikuga. Eelkirjeldatud protsesside tulemusena olid katsekehad ettevalmistatud struktuurianalüüsiks.

Rikastatud kihi sügavuse määramiseks mõõdeti kõikide katsekehade ristlõikepinnalt nende pinnakõvadust Vickersi meetodiga. Antud kõvaduse määramise meetod seisneb selles, et teemantpüramiid surutakse materjali sisse fikseeritud jõuga ning seejärel mõõdetakse tekitatud jäljendi diagonaalide pikkused. Vickersi kõvadus  $HV$  arvutatakse vastava valemi 2.3. järgi [15].

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.3.)$$

kus  $F$  on jõud N;

$d$  – jäljendi keskmine diagonaali pikkus mm.

Jäljendi keskmine diagonaali pikkus  $d$  leitakse valemiga 2.4. [15].

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.4.)$$

kus  $d_1$  on esimene diagonaal mm;

$d_2$  – teine diagonaal mm.

Vickersi kõvaduse tähistamisel lähtutakse rakendatavast koormusest ja selle rakendamise kestusest. Standardsete katsetingimuste  $F = 30$  kgf ja koormamise kestuse 10–15 s korral ei lisata midagi muud peale tähise HV. Teistel koormustel ja kestustel tuleb peale tähist HV välja tuua katsetingimused: koormus ja koormamise kestus. Näiteks tähis 220HV 5/20 tähendab, et Vickersi kõvadusarv on 220, mis on määratud koormusel  $F = 5$  kgf ja kestusel 20 s. Vickersi kõvadusarvu ühikuks on kgf/mm<sup>2</sup>, mida üldjuhul ei märgita. Antud töö katsete käigus teostati kõvaduse mõõtmised koormusega 1 kgf kestusel 15 s. Võrreldes Rockwelli meetodiga on tekitatav jäljend palju väiksem ning seega sobib Vickersi meetod mistahes metallide ja sulamite ning õhukeste detailide pinnakihi kõvaduse määramiseks. Lisaks on Vickersi meetod kergemini rakendatav, sest arvutused ei sõltu otsiku suurusest ning sama otsikut saab sõltumata kõvadusest kasutada kõikide materjalide korral. [14, 15]



Kõvaduse mõõtmise teostati mõõtemikroskoobil IndentaMet 1100, mis on kujutatud joonisel 2.5.



**Joonis 2.5.** Mikrokõvaduse mõõtmise seade IndentaMet 1100

Esmalt valiti välja see katsekeha sektor, kus serv oli kõige paremini vaadeldav. Järgnevalt kinnitati detail mikroskoobi töölauale ning fookusseeriti selle pind. Seejärel määrati detaili serv ning teostati esimene mõõtmine 0,2 mm kaugusel servast. Mõõtepunkti minimaalne kaugus servast  $a$  on leitud valemi 2.5. järgi [16].

$$a \geq 2,5 \cdot d \quad (2.5.)$$

Järgnevalt teostati veel 9 mõõtmist sammuga 0,2 mm kuni sügavuseni 2 mm. Mõõtmised teostati eeltoodud parameetrite alusel kõikidele katsekehadele. Mõõtmistulemused on tabelina välja toodud antud töö lisades ning nende analüüsimisel võrreldi saadud tulemusi poolmartensiitse struktuuri kõvadusega süsiniku sisaldusel 0,8%. Vastavaks kõvaduseks on 590 HV1/15 (54 HRC) ning mõõtmiskohti, kust mõõdeti väiksem kõvadusarv, ei loetud enam süsinikuga rikastatuks. [17]

## 2.4. Labortöö juhendi koostamine

Käesoleva bakalaureusetöö põhieesmärgi täitmiseks ehk labortöö koostamiseks tuli ette valmistada vastav blankett, mis sisaldab labortöö eesmärki, töö käiku ja ülesandeid ning töö kokkuvõttes nõutavaid punkte.

Labortöö ettevalmistamisel lähtuti sellest, et kahe akadeemilise tunni ehk 90 minuti jooksul saaks õppejõud anda tsementiitimisest piisava ülevaate, selgitada labortöö eesmärki ja töö käiku ning üliõpilased jõuaksid ka praktiliste tegevusteni. Kuna tsementiitimine on pikaajaline protsess, siis märgiti labortöö blanketti, et pärast seisutusaega võtab tsementiitimise kasti ahjust välja labortöö juhendaja. Ajalise faktori tõttu tuli ka tsementiitimisele järgnev termotöötlemine osa integreerida teiste labortöödega, kus käsitletakse normaliseerimist, karastamist ja noolutamist. Selline töökorraldus omab eelduste kohaselt positiivset mõju aidates omavahel siduda erinevaid labortöid. Lisaks on sel moel paremini jälgitav iga protsessi mõju konkreetsele katsekehale.

Töö praktilises osas viiakse tsementiitimine läbi ühele katsekehale, mis markeeritakse vastava tähisega, pannakse kirja detaili mõõtmed ning mõõdetakse ümaralt külgpinnalt pinnakõvadus sobiva kõvaduse määramise meetodiga. Seejärel määravad üliõpilased tsementiitimise protsessi parameetrid (kuumutustemperatuuri ja seisutusaega) ning asetavad detaili koos karbonisaatoriga tsementiitimiseks ette nähtud kasti sisse. Kastile asetatakse kaas ning tühimikud täidetakse liivaga. Kast tõstetakse selleks ette nähtud tõsteroobiga ahju ning pärast seisutusaega võtab juhendaja kasti ahjust välja. Nagu eespool mainitud, viiakse täiendav termotöötlemine läbi teiste labortööde käigus. Pärast termotöötlemist lõigatakse katsekeha pooleks ning mõõdetakse ristlõikepinnalt südamikülvõvadus ja ümaralt külgpinnalt tsementiititud pinna kõvadus. Seejärel leitakse algolekus katsekeha ja tsementiititud ning termotöödeldud katsekeha pinnakõvaduste muut. Kõik töö käigus määratud parameetrid ja katsetulemused pannakse kirja vastavasse tabelisse, mis on lisatud labortöö teisele leheküljele. Labortöö üksikasjalik kirjeldus on kirjas vastavas blanketis, mis on lisatud käesoleva bakalaureusetöö lisadesse.

Töö kokkuvõtte ja analüüsi osas tuleb leida vastused küsimustele, milliseid terase omadusi saab sellega parandada ning millised on antud meetodi rakendusvõimalused. Lõpptulemusena peaksid töö teostanud insener-tehnilise haridusega üliõpilased mõistma süsinikteraste termokeemilise töötlemise põhimõtteid ning nende rakendusvõimalusi.

## 2.5 Ohutustehnika eeskirja täiendamine

Seoses uue labortöö teostamisega tuli lähtuvalt töö ohukohtadest üle vaadata ka termika labori ohutustehnika eeskiri. Antud ülesande täitmiseks tutvuti põhjalikult antud eeskirjaga ning tehti töö autori poolt soovitud teatud eeskirja punktide täiendamiseks. Hetkel termika laboris kasutatav ohutustehnika eeskiri on koostatud vastutavate õppejõudude poolt ning üliõpilaste instrueerimine toimub iga semestri alguses vastava õppeaine esimestel tundidel. Vajadusel viiakse läbi täiendav instruktaaz vahetult enne labortöö teostamist.

Kõige suuremaks riskifaktoriks määrati tsementiitumise protsessi käigus eralduvad gaasid. Karbonisaatori kuumutamisel eralduvate põlemisgaaside ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) ja muude protsessi käigus tekkivate gaaside laboriruumi keskkonda sattumise vältimiseks paigutati kuumutusahi tõmbekappi. Antud põlemisgaasid on ruumi sattumise puhul ohtlikud just seetõttu, et ruumis väheneb hapniku hulk. Ruumi täidavad mittetäieliku põlemisprotsessi tulemusena eraldunud suits ning erinevad gaasid, mis on inimese tervisele kahjulikud. Kuum suits koguneb ruumi ülemistesse kihtidesse ning täidab üsna lühikese ajaga ülemise ruumiosa suitsupadjaga [18]. Seetõttu on oluline, et tsementiitumise käigus eralduvate gaaside eemaldamiseks asetatakse kuumutusahi tõmbekappi ning lülitatakse sisse täiendav sissepuhe, et kompenseerida tõmbekapi väljatõmmet.

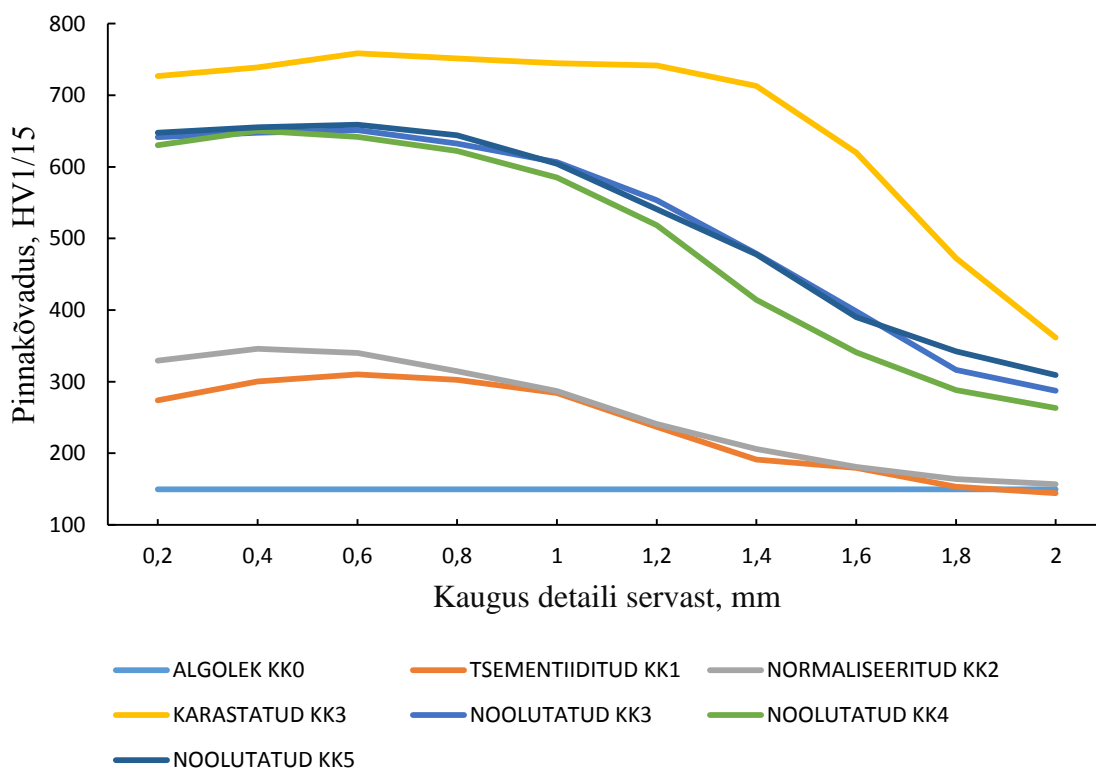
Teise ohukohana märgati seda, et tsementiitumise kasti tuleb alati tõsta selleks otstarbeks ette nähtud tõsteroobiga. Kuumutusahju kasutamisel on oluline, et ahju uks oleks võimalikult vähe aega avatud. Kui ahju uks on avatud rohkem kui 10 sekundit, siis langeb ahju temperatuur ligi  $50^{\circ}\text{C}$  ning seetõttu on oluline, et tsementiitumise kasti ahju sisestamine toimuks võimalikult kiiresti. Seda saab hästi teostada nii, et üks inimene avab ahju ukse ning teine sisestab tõsteroobiga kasti ahju sisse. Sel juhul avatakse ahju uks vaid mõneks sekundiks ning märgatavat temperatuuri langust ei esine. Lisaks on tõsteroobi kasutamisega välistatud kasti mahakukkumine ning katseseadmete mehaaniline vigastamine.

Uue labortööga ilmnunud riskifaktorid tuleb välja tuua ohutustehnika eeskirjas ning üliõpilasi vastavalt nendele ka instrueerida. Uusi leitud ohukohti pole küll palju, kuid inimeste tervise ja laboriseadmete hoidmise huvides on oluline, et üliõpilased oleksid antud ohtudest teadlikud ning oskaksid vajadusel operatiivselt tegutseda. Täiendatud ohutustehnika eeskiri on leitav käesoleva töö lisadest.

### 3. TULEMUSED JA TULEMUSTE ANALÜÜS

#### 3.1. Rikastatud kihi sügavuse ja kõvaduse määramine

Vickersi meetodil määratud pinnakihi kõvaduse mõõtmistulemuste alusel on koostatud joonis 3.1. Joonisel on helesinise joonega tähistatud katsekehade ristlõikepinna algkõvadus. Sirge joon näitab, et materjal on kogu ristlõike ulatuses homogeenne ning pinnakihi kõvadus ei eristu südamikust. Tsementiitud ja termotöödeldud katsekehade graafikutel on aga selgesti eristatav kõvaduse langus, mis saab alguse vahemikus 0,8–1 mm pinnakõvadusel 620–590 HV1/15 (55,3–54,1 HRC). Võib järeldada, et selle vahemikuni ulatub süsinikuga rikastatud kiht. Seejärel süsiniku kontsentratsioon väheneb ning selle tõttu langeb ka kõvadus. Järelikult on suudetud tsementiitumise protsessi käigus katsekehade pinda soovitud sügavuseni süsinikuga rikastada.



**Joonis 3.1.** Katsekehade pinnakõvaduse mõõtmistulemused

Katsekehade väiksem kõvadus sügavusel 0,2–0,4 mm võib olla tingitud sellest, et iga täiendava termotöötlemise protsessiga põleb pinnakihist välja teatud kogus süsinikku, mis annab terasele soovitud kõvaduse. Antud tendents on märgatav ka kõikidel termilise töötlemise läbinud katsekehade graafikutel.

Kokkuvõttes leiti, et rikastatud kihi sügavus kõvaduse määramise meetodil on 0,8–1 mm.

Maksimaalseks lõplikuks pinnakõvaduseks peale viimast termotöötlemise etappi ehk noolutamist määrati 647,9 HV1/15 (56,42 HRC), mis mõõdeti katsekeha KK5 pinnalt. Suurem pinnakõvadus mõõdeti karastatud katsekeha KK3 pinnalt, mis oli 726,7 HV1/15 (59,43 HRC). Seega võib tõeseks lugeda väite, et pärast termilist töötlemist on võimalik saavutada tsementiititud katsekeha pinnakõvaduseks 55–65 HRC. Suurem pinnakõvadus oleks saavutatav kui pikendada tsementiitumise seisutusaega või teha korrektuurid termilise töötluse parameetrites.

Rikastatud kihi sügavuse tulemuse kontrollimiseks vaadeldi tsementiititud detaili servi mõõtemikroskoobi Zeiss AxioImager 2 all. Antud seadmega on võimalik teostada ka mõõtmisi. Vaadeldavaks katsekehaks valiti KK1, millele oli teostatud ainult tsementiitumine ning kus eelduste kohaselt pidi olema rikastatud kiht kõige paremini eristatav ülejäänud struktuuriosadest. Detailile teostati rikastatud kihi mõõtmine kolmes erinevas sektoris ning keskmiseks tulemuseks saadi 0,9976 mm. Rikastatud kihid koos mõõtmistulemustega on välja toodud töö lisades. Saadud tulemus kinnitab kõvaduse mõõtmisel leitud tulemust, et rikastatud pinnakihi sügavus jääb vahemikku 0,8–1 mm. Seega võib tõeseks lugeda ka kirjanduses välja toodud väite, et lõpptemperatuuril seisutamisega on ühe tunniga tsementiititav 0,15 mm paksune pinnakiht. Käesoleva peatükiga täideti teine bakalaureusetööle seatud eesmärk kontrollida katsete teel kirjanduses esitatud väiteid tsementiitumise parameetrite kohta.

## **3.2. Katsekehade struktuuri analüüs**

### **3.2.1. Teras algolekus**

Tsementiitumata ja termotöötluseta terase struktuuris on selgelt eristatavad ferriidi ja perliidi terad. Algolekus terase struktuur 500-kordse suurendusega on kujutatud joonisel 3.2.

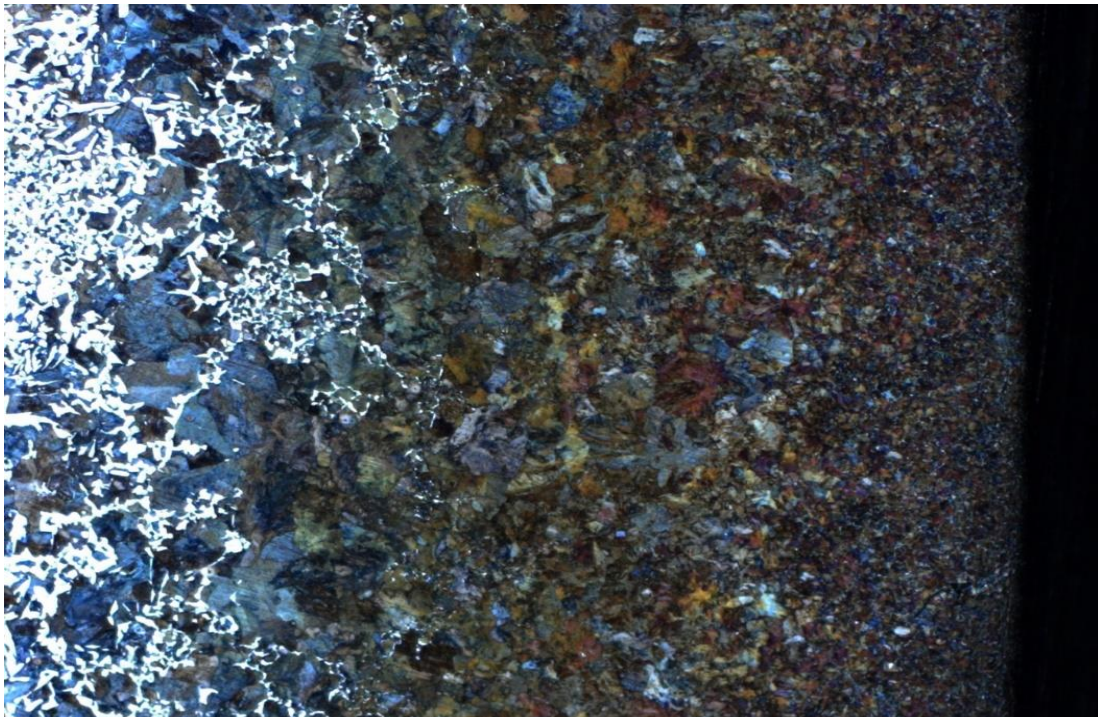


**Joonis 3.2.** Algolekus terase pinnakiht 500-kordse suurendusega

Struktuuris on ülekaalus ferriit (valged alad) ning lisaks on struktuuris eristatav perliit (tumedamad kihilised alad). Antud struktuur on iseloomulik madala süsinikusisaldusega ( $C < 0,2\%$ ) terase struktuuripildile. Katsekeha pinda vaadeldi mitmest asukohast ning järeldati, et materjali struktuur on kogu ristlõike ulatuses ühesugune.

### 3.2.2. Teras tsementiitiduna

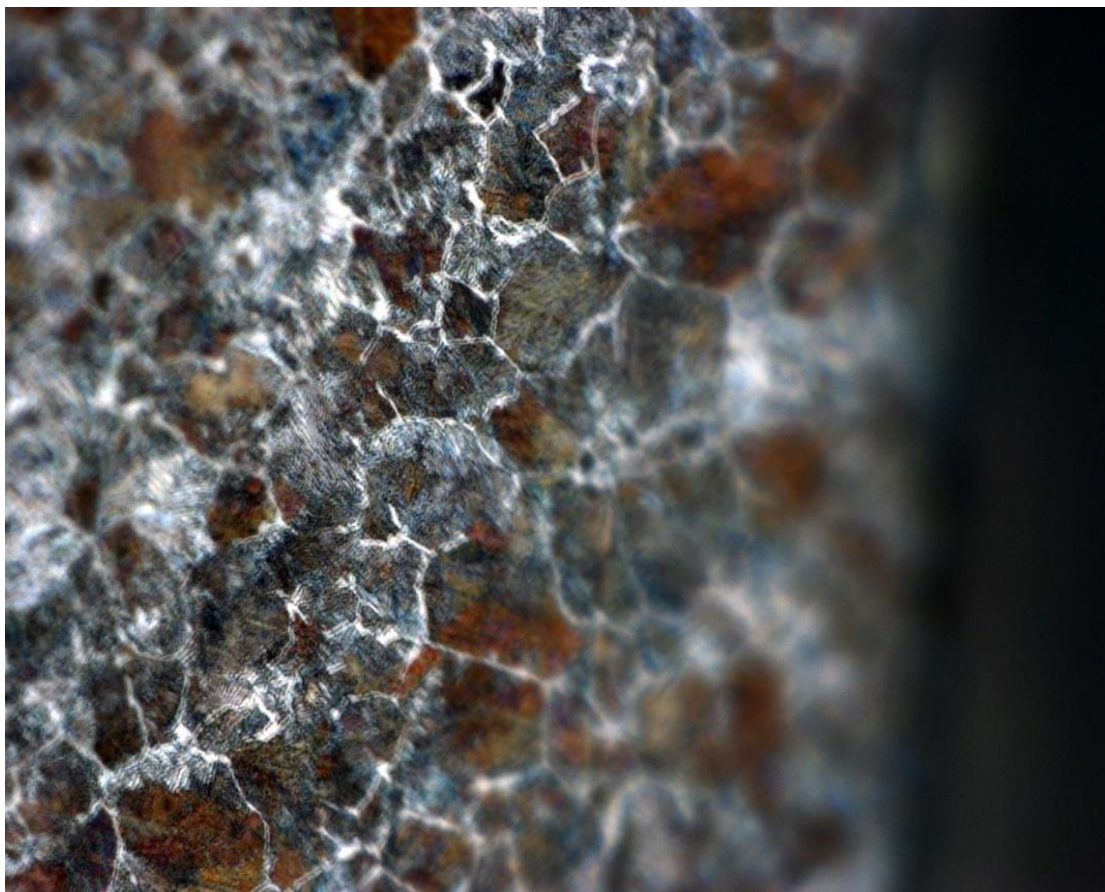
Tsementiititud katsekeha struktuuris on selgesti eristatavad süsinikuga rikastatud pinnakiht ning algoleku säilitanud südamik. Antud struktuur on kujutatud joonisel 3.3.



**Joonis 3.3.** Tsementiititud katsekeha pinnakiht 50-kordse suurendusega

Katsekeha südamikus on selgesti eristatavad ferriidi ja perliidi terad, mis on omased ka terase algstruktuurile. Üleminekutsoonis on märgatavad suurenenud perliidi terad, mille tõttu on vähenenud ferriidi terade hulk. Pinnalähedases kihis on nähtav tsementiit, mis moodustab perliidi terade ümber valge võrgustiku. Antud võrgustik on paremini nähtav joonisel 3.4., kus on kujutatud katsekeha pinnalähedast kihti 500-kordse suurendusega. Võrgustiku moodustab tsementiitumise protsessi käigus katsekehale lisatav monosüsinik, mis koos rauaga moodustab tsementiidi ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Tsementiidile on omased suur kõvadus ja haprus. Seetõttu on pärast tsementiitumise protsessi pinnakõvadus võrreldes algolekuga küll tõusnud, kuid maksimaalse kõvaduse saavutamiseks, hapruse vähendamiseks ja struktuuri peenendamiseks peab protsessile järgnema termiline töötlemine.



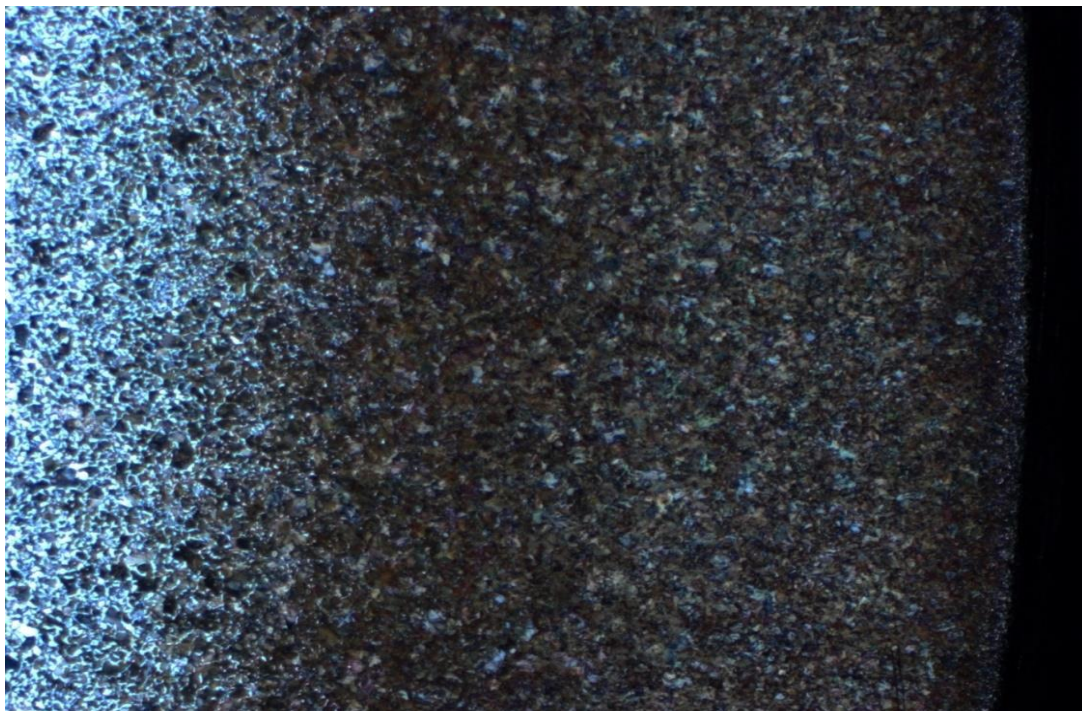


**Joonis 3.4.** Tsementiitud katsekeha pinnakiht 500-kordse suurendusega

### **3.2.3. Teras normaliseerituna**

Alajaotises 2.2. välja toodud valemite 2.1. ja 2.2. abil määrati tera keskmiseks pindalaks  $106 \mu\text{m}^2$  tsementiitud katsekehal ning  $64 \mu\text{m}^2$  normaliseeritud katsekehal. Tsementiitud katsekeha tera numbriks määrati tabeli 2.6. abil 8 ja normaliseeritud katsekehal samuti number 8. Antud meetodil määratud tera numbrid on küll samad, kuid arvulised erinevused mõõtmistulemustes kinnitavad, et terase struktuur on normaliseerimise tulemusena muutunud peeneteralisemaks. Seda väidet toetab ka visuaalne kontroll, sest terade suurus on silmnähtavalt vähenenud. Võib järeldada, et normaliseerimine täitis oma eesmärgi ning avaldas katsekehale märgatavat mõju.

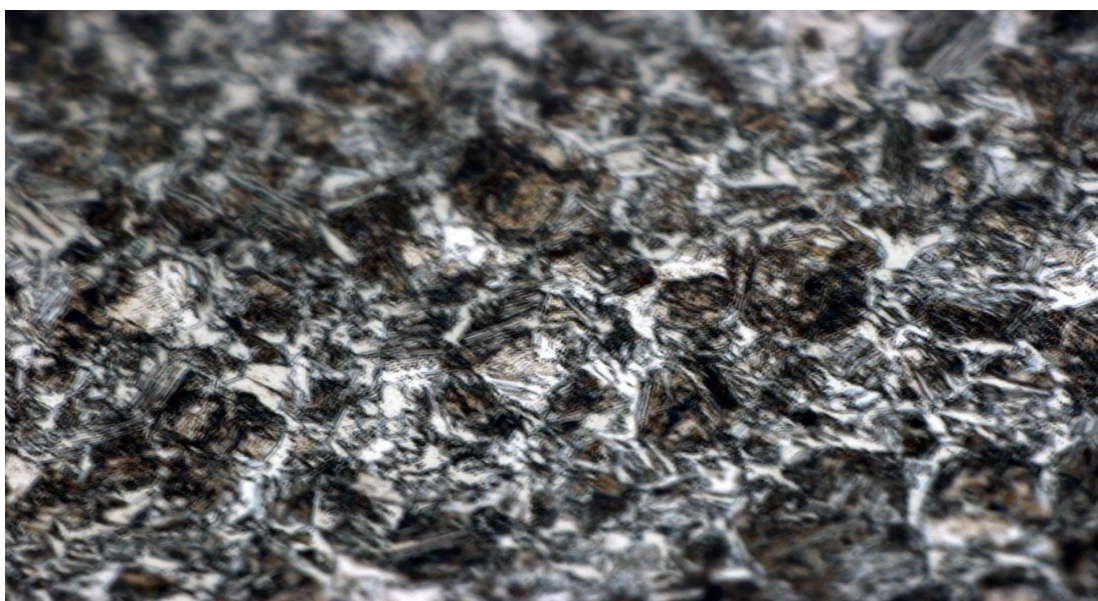
Sarnaselt tsementiitud katsekehale on normaliseeritud katsekeha puhul südamikus selgesti eristatavad ferriidi ja perliidi terad. Normaliseeritud katsekeha struktuur on kujutatud joonisel 3.5. Üleminekutsoonis on märgatavad perliidi terad, mis on võrreldes tsementiitud katsekeha pinna sama kohaga palju väiksema pindalaga. Pinnalähedases kihis pole tsementiidi võrgustik enam väga selgesti eristatav.



**Joonis 3.5.** Normaliseeritud katsekeha pinnakiht 50-kordse suurendusega

#### **3.2.4. Teras karastatuna**

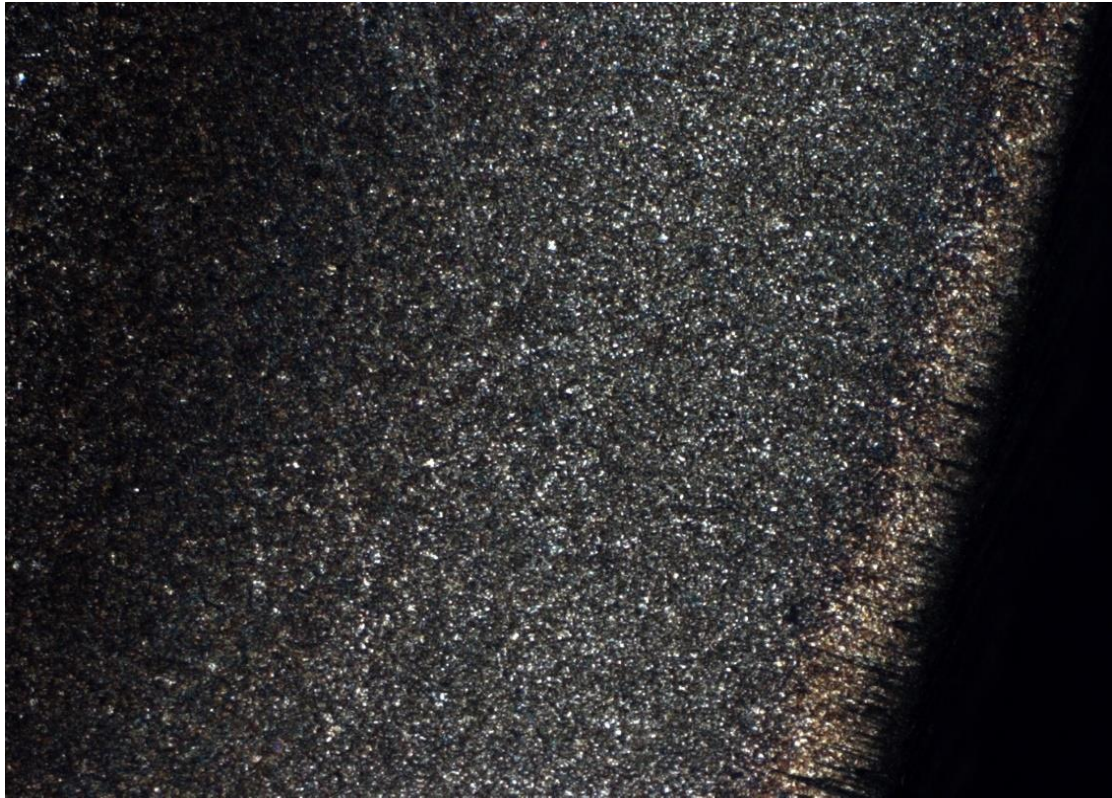
Katsekeha KK3 küljest pärast karastamist lõigatud proovitüki struktuuripildil on selgesti jälgitav teravate piirjoontega martensiitne struktuur, mis on kujutatud joonisel 3.6. Lisaks on struktuuris teatud kogus jääkausteniiti. Võttes arvesse martensiidi kõvaduse sõltuvust C-sisaldusest ning antud katsekeha suuremat kõvadust võrreldes normaliseeritud katsekehaga, siis võib tõdeda, et karastamine on olnud edukas ning toimunud on martensiitmuutus.



**Joonis 3.6.** Karastatud katsekeha pinnakiht 500-kordse suurendusega



Katsekeha serva pinnastruktuuris kuni 1 mm sügavuseni on eristatav austeniidi metastabiilne struktuur ehk süsinikuga üleküllastunud ferriit. Serva pinnastruktuur on näidatud joonisel 3.7. Kuna pinnakihti on tsementiitumise käigus süsinikuga rikastatud, siis on katsekehal pärast karastamist kõva pinnakiht ning väiksema kõvadusega südamik.



**Joonis 3.7.** Karastatud katsekeha pinnakiht 50-kordse suurendusega

### **3.2.5. Teras noolutatuna**

Katsekehadele KK3, KK4 ja KK5 viidi läbi madalnoolutamine temperatuuril 200°C seisutusaajaga 60 minutit. Antud parameetrid valiti seetõttu, et antud temperatuuri juures ei lange detaili kõvadus sellisel määral, mis mõjutaks selle kasutusomadusi. Pärast seisutusaega jahutati katsekehad seisvas õhus. Madalnoolutamine oli ühtlasi viimaseks tsementiititud katsekehade termilise töötlemise operatsiooniks.

Katsekehade servast tehtud piltidel on struktuuris eristatavad noolutusmartensiit (valged teravate servadega alad) ja karbiidi osakesed, mis on noolutamise käigus sadestunud martensiitsesse struktuuri (tumedamad alad). Noolutatud katsekeha KK3 struktuuripilt on kujutatud joonisel 3.8. Kontrollseeria katsekehade KK4 ja KK5 noolutatud struktuuripildid on lisatud antud töö lisadesse.



**Joonis 3.8.** Noolutatud katsekeha pinnakiht 500-kordse suurendusega

Karbiidi tumedam värvus on tingitud konkreetse söövitushusega Nital söövitamisest. Võrreldes karastatud katsekeha KK3 struktuuripildiga on martensiidi struktuuriosad ümaramate servadega. Samuti on vaadeldavas alas katsekeha struktuur peenenenud. Toimunud muutused on küll halvasti jälgitavad, kuid arvestades, et tegemist on madalnoolutusega, siis on struktuuripilt ootuspärane. Seega võib järeldada, et madalnoolutamise protsess on olnud edukas ning tsementiiditud katsekehad on saavutanud soovitud lõpptulemuse.

Käesoleva alajaotisega täideti bakalaureusetööle seatud ülesanne teostada katsekehade ristlõikepinnale vastavate tehniliste vahendite abil põhjalik struktuurianalüüs. Struktuuripildid olid ootuspärased ning vastasid kirjanduses välja toodud kirjeldustele. Analüüsi käigus selgus, miks kõnealune terminiline töötlemine vajalik oli ning kuidas see mõjutas tsementiiditud terase struktuuri. Samuti olid jälgitavad erinevad struktuuriosad ning seetõttu võib järeldada, et mikrolihvide söövitamiseks kasutatud söövitushus Nital oli valitud korrektselt ning valmistatud õiges proportsioonis.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli valmistada ette laboratoorne töö tsementiitimise läbiviimiseks tehnikainstituudi termika laboris. Teema laiemaks mõistmiseks anti ülevaade terase pindtugevdamise võimalustest ning nende praktilisest kasutusest tööstuses. Töö praktilises osas valmistati tsementiitimiseks sobilik kast materjalist S235JR ning viidi kolme katseseeria käigus läbi tsementiitimise protsess kokku viiele katsekehale, mis olid valmistatud materjalist S355J2 süsiniku sisaldusega 0,16%. Pärast tsementiitimist teostati detailidele termiline töötlemine. Vastavalt kirjandusele olid termilise töötlemise protsessideks normaliseerimine, karastamine ja noolutamine. Tulemuste analüüsiks valmistati katsekehade mikrolihvid ja söövitati poleerpindasid söövituslahusega Nital. Analüüsi käigus määrati ristlõikepinnalt vastava aparatuuri abil kõikide katsekehade pinnakõvadus Vickersi meetodil ning rikastatud kihi sügavus. Lisaks määrati erinevad struktuuriosad nii detaili rikastatud servakihi kui ka südamikus.

Tulemuste analüüsiga jõuti järeldusele, et kirjanduses välja toodud väited tsementiitimise parameetrite määramise kohta on tõesed ning rakendatavad ka tehnikainstituudi termika laboris. Pinnakõvaduse mõõtmistulemuste alusel koostatud joondiagrammilt on näha kõvaduse langus, mis saab alguse vahemikus 0,8–1 mm. Seega ulatub selle vahemikuni süsinikuga rikastatud kiht, mis annab pinnakihi soovitud kõvaduse. Maksimaalseks lõplikuks pinnakõvaduseks peale noolutamist saadi Vickersi kõvaduse määramise meetodil 647,9 HV1/15, mis teisendatult Rockwelli skaalale on 56,42 HRC. Antud tulemus mõõdeti katsekeha KK5 pinnalt. Rikastatud kihi sügavust mõõdeti tsementiititud katsekeha kolmes erinevas sektoris ning keskmiseks tulemuseks saadi 0,9976 mm. Antud tulemused vastasid ootustele ning protsesside parameetritele. Struktuuripildid, mis olid tehtud detailidest peale iga termotöötlemise operatsiooni, olid ootuspärased ning vastasid kirjanduses välja toodud kirjeldustele. Seega võib järeldada, et nii tsementiitimise kui ka järgneva termotöötlemise parameetrid olid lähtuvalt soovitud tulemusest õigesti valitud. Analüüsi käigus selgus ka see, miks termiline töötlemine vajalik oli ning millist mõju avaldas see töödeldud terase struktuurile.

Antud bakalaureusetööle seatud eesmärgi täitmiseks püstitatud ülesanded said kogu mahus täidetud. Töö tulemused ja analüüs on abiks tsementiitimise protsessi mõistmisel ning rakendamiseks tudengiprojektides. Töö jätku-uuringud võiksid seisneda tsementiitimise mõjus erineva keemilise koostisega terastele ning protsessi parameetrite korrigeerimises.



## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., Veinthal, R.** (2015). Materjalitehnika I: Tehnomaterjalid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 337 lk.
2. **Kirsi, T.** (1983). Remonditööd: remondikojuhataja käsiraamat. Tallinn: Valgus. 312 lk.
3. **Pakk, V.** (1990). Metallide termiline ja termokeemiline töötlemine. Tallinn: Valgus. 92 lk.
4. Joonis 1.1. Vector Vacuum Furnace with High Pressure Gas Quench.–*Seco Vacuum Technologies koduleht*. <http://www.secovacusa.com/product/vector-single-chamber-high-pressure-gas-quench> (25.04.2017).
5. **Jaster, M.** (2010). Why vacuum carburizing?–*Gear Technology*. Nr. 4. [e-ajakiri] <http://www.geartechnology.com/issues/0310x/vacuum.pdf> (25.04.2017).
6. **Poor, R., Verhof, S.** (2002). New Technology Is The Next Step In Vacuum Carburizing.–*Industrial Heating*. Nr. 10. [e-ajakiri] <https://www.surfacecombustion.com/pdf/SurfaceFeature.pdf> (25.04.2017).
7. **Boniardi, M., D'Errico, F., Tagliabue, C.** (2005). Influence of carburizing and nitriding on failure of gears.–*Engineering Failure Analysis*. Nr 13. [e-ajakiri] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630705001470>
8. **Jaster, M.** (2012). Large gears.–*Gear Technology*. Nr. 3. [e-ajakiri] <http://www.ipsenusa.com/Documents/Ipsen-USA/Editorial/GearTech-Heat-Treat-Article-MarApr2012.pdf>
9. Joonis 1.2. USA ettevõtte L&H Welding & Supply poolt toodetud 3,2 m läbimõõduga kaevandusseadme hammasratas.–*Modern Machine Shop koduleht*. <http://www.mmsonline.com/articles/grinding-big-gears-from-blanks> (08.05.2017)
10. AutoCAD DXF.–*Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/wiki/AutoCAD\\_DXF](https://en.wikipedia.org/wiki/AutoCAD_DXF) (08.05.2017).
11. Tsementiitimiseks kasutatava karbonisaatori koostis.–*SIA Latvijas Ķīmija koduleht*. <http://www.chemical.lv/lv/industrial-chemistry/carburizer.html> (08.05.2017).
12. Katsekehade materjali sertifikaat standardi DIN EN 10025 järgi.–*OÜ Enimor Met koduleht*. [https://www.upload.ee/files/7044575/Katsekehade\\_materjali\\_sert.jpg.html](https://www.upload.ee/files/7044575/Katsekehade_materjali_sert.jpg.html) (08.05.2017)
13. TE.0244 Materjaliõpetuse laboratoorne töö nr. 2: Metallograafia, metallimikroskoobid. (2017). Laboratoorse töö aruanne. Koostanud Kaarel Soots. EMÜ Tehnikainstituut. 2 lk.
14. **Bramfitt, L.B., Benscoter, O.A.** (2002). Metallographer's Guide. Practices and Procedures for Irons and Steels. Materials park: ASM International. 367 lk.
15. IndentaMet 1100 Series Microindentation Hardness testers: Operation and Maintenance Instructions. (2004). Kasutus- ja hooldusjuhend. Buehler Ltd. 23 lk.
16. Mehaanikainseneri käsiraamat. (2015). /Üldtoim. P. Kulu., toim. E. Hendre., küljen. M. Veermäe., kujun. T. Eikholm. Tallinn: TTÜ kirjastus. 492 lk.
17. **Kulu, P.** (2005). Metalliopeetus. Tallinn: TTÜ kirjastus. 230 lk.

18. Sisekaitseakadeemia Päästekolledži tuleohutuse õpiobjekt. - *Sisekaitseakadeemia Päästekolledž*.  
- <http://cmsimple.e-ope.ee/tulekahju/index.php> (22.05.2017).

# **CARBON STEEL CARBURIZING IN THE INSTITUTE OF TECHNOLOGY'S HEAT TREATMENT LABORATORY**

## **SUMMARY**

The purpose of this bachelor's thesis was to prepare laboratorial work to perform carburizing in the Institute of Technology's heat treatment laboratory. To understand the topic, a proper overview of steel surface hardening was done. In the practical part of this work was designed and assembled box for carburizing from material S235JR. Furthermore, to lift the box, a special poker was made. In addition 3 carburizing processes with heat treatment to 5 samples in total were carried out. The samples were made of material S355J2 with a carbon content of 0,16%. For the analysis the samples were micro-grinded and etched with reagent Nital. During the analysing process the hardness of the surface and the depth of the enriched surface for each sample was found out. Moreover different structural parts on the edge of the sample and in the core were determined.

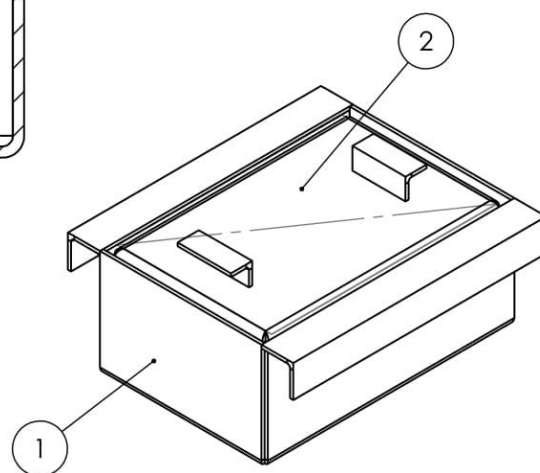
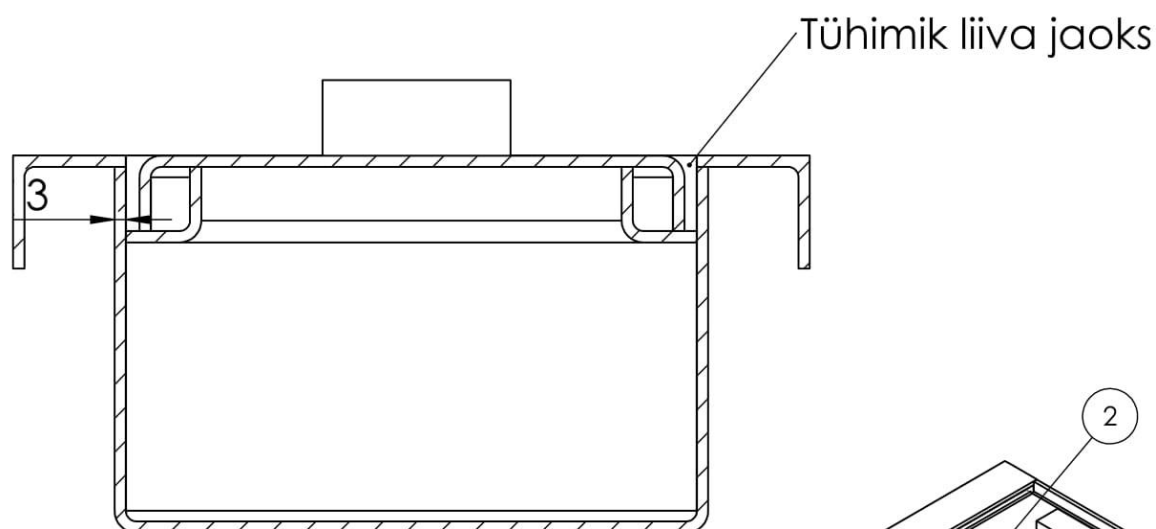
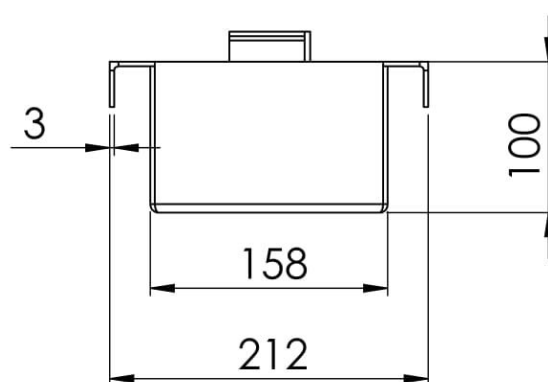
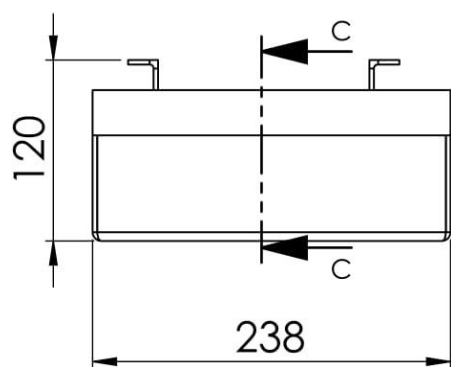
The analyzes concluded that the facts about carburizing process given in the literature were correct and applicable in the heat treatment laboratory. On the figure 3.1. which bases on the surface hardness measuring data is seen the decrease of the hardness and it starts between 0,8–1 mm. Therefore the steel is enriched to this limit with carbon, which gives it the needed hardness. The maximum hardness of the surface was 647,9 HV1/15 (56,42 HRC), which was measured from the sample KK5. The average depth of the enriched surface was 0,9976 mm, which was measured from three different sectors of the carburized sample KK1. These results were in accordance with previous expectations and the process parameters. Besides these results, the complete structural analysis was carried out. The results of the analysis were as expected and relevant to the descriptions given in the literature. It can be concluded, that the parameters for the carburizing were chosen correctly according to the desired outcome.

The tasks of this thesis were all accomplished and the main goal was achieved. On the basis of the performed tests was composed laboratorial work form, which can be used in TE.0244 Material science's classes. Moreover the safety instructions of the heat treatment laboratory were complemented. The results of this present thesis are further applicable to understand the carburizing process. Any further surveys should investigate the effect of carburizing to different marks of steels and the affect of correcting the carburizing process parameters.

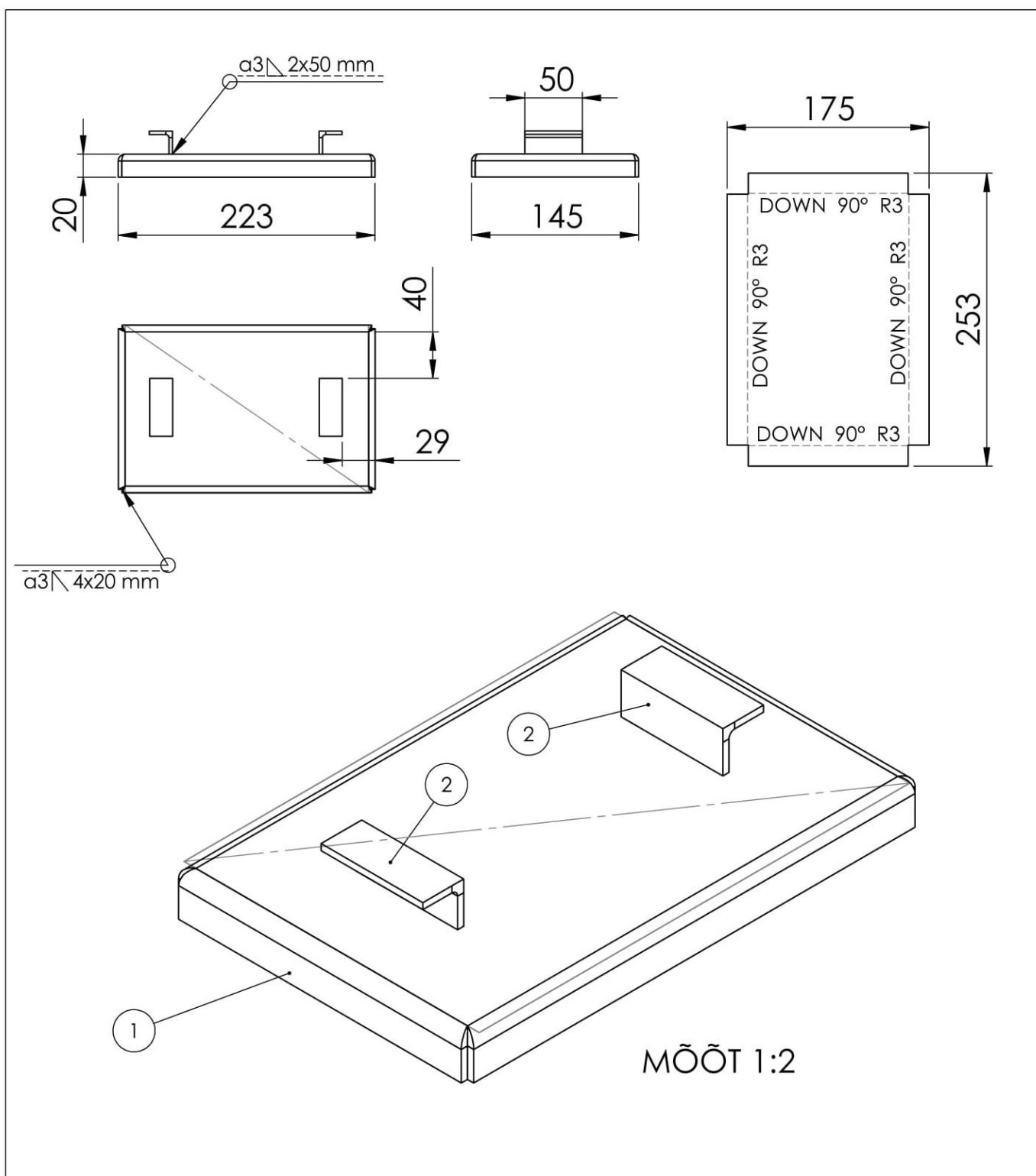
**LISAD**

## **Lisa 1. Tsementiitumise kasti ja tõsteroobi tehnilised joonised**



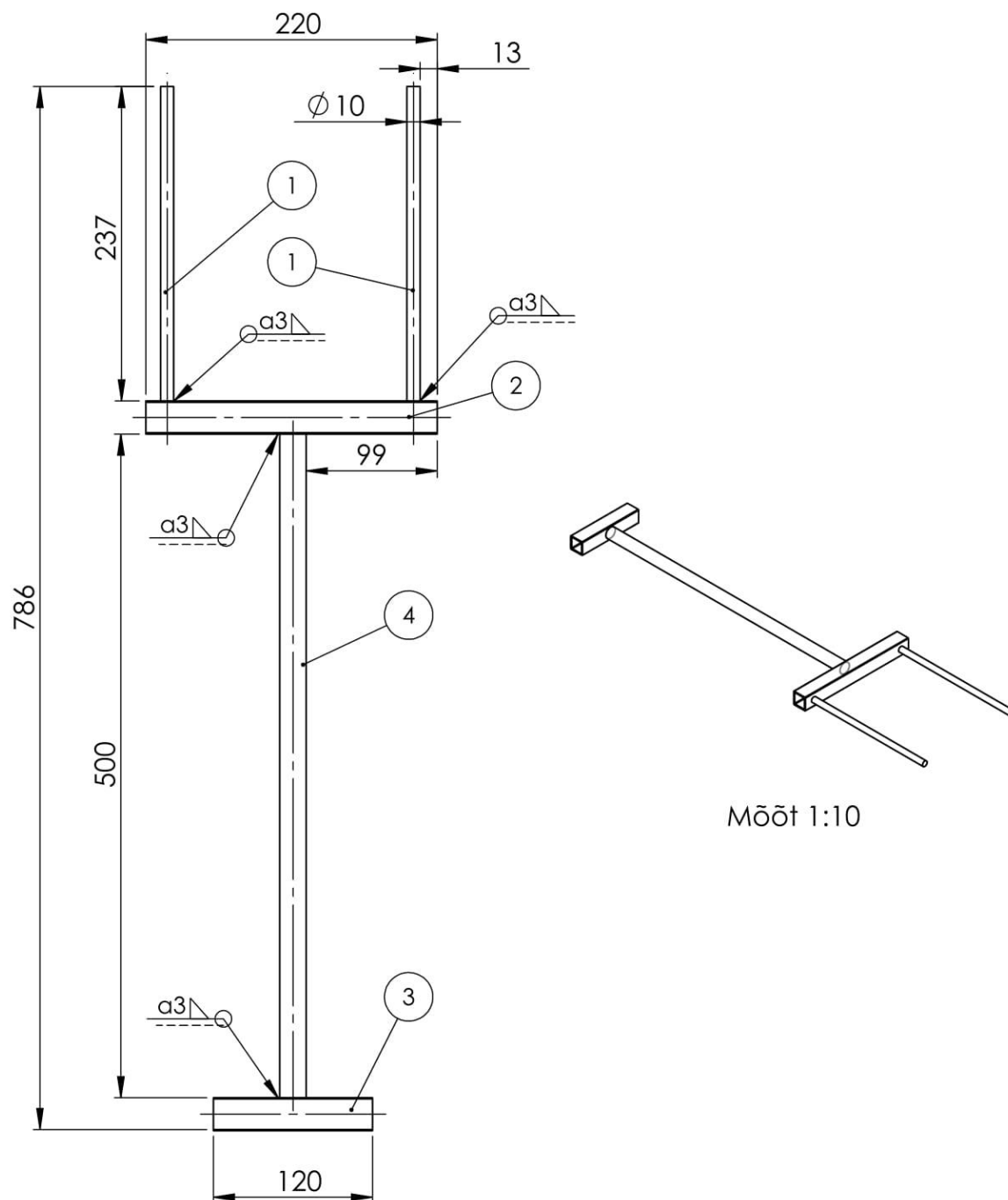


2	2	Tsementiitimise kasti kaas, S235	TA 17/140592 A 02 00 K	1	
1	1	Tsementiitimise kast, S235	TA 17/140592 A 01 00 K	1	
<b>Osa</b>	<b>Väli</b>	<b>Nimetus, materjal</b>	<b>Tähis</b>	<b>Hulk</b>	<b>Märkus</b>
	<b>Materjal:</b>	S235	<b>Näitamata piirhälbed:</b>	<b>Mass:</b>	<b>Mõõt:</b>
			ISO-2768-mK	5.0 kg	1:5
<b>Teostas</b>	Sander Kukk	<b>Nimetus:</b> TSEMENTIITIMISE KASTI KOOST			
<b>Kontrollis</b>	Kaarel Soots				
<b>Kinnitas</b>	Kaarel Soots				
<b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences			<b>Leht:</b>	<b>Tähis:</b>	
			1/1	TA 17/140592 A 00 00 K	

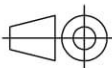



2	2	Nurkprofiil 20x20x3 mm, S235	TA 17/140592 A 02 02 D	2	L=50 mm
1	1	Tsementiitimise kasti kaas, S235	TA 17/140592 A 02 01 D	1	S=3 mm
<b>Osa</b>	<b>Väli</b>	<b>Nimetus, materjal</b>	<b>Tähis</b>	<b>Hulk</b>	<b>Märkus</b>
	<b>Materjal:</b>	S235	<b>Näitamata piirhälbed:</b>	<b>Mass:</b>	<b>Mõõt:</b>
			ISO-2768-mK	1.1 kg	1:5
<b>Teostas</b>	Sander Kukk	<b>Nimetus:</b> TSEMENTIITIMISE KASTI KAAS			
<b>Kontrollis</b>	Kaarel Soots				
<b>Kinnitas</b>	Kaarel Soots				
			<b>Leht:</b>	<b>Tähis:</b>	
			1/1	TA 17/140592 A 02 00 K	





Mõõt 1:10

4	4	Ümardoru 20x2 mm, S235	TA 17/140592 A 03 04 D	1	L=500 mm
3	3	Nelikanttoru 30x30x2 mm, S235	TA 17/140592 A 03 03 D	1	L=120 mm
2	2	Nelikanttoru 30x30x2 mm, S235	TA 17/140592 A 03 02 D	1	L=220 mm
1	1	Ümarprofiil $\phi 10$ mm, S235	TA 17/140592 A 03 01 D	2	L=260 mm
<b>Osa</b>	<b>Väli</b>	<b>Nimetus, materjal</b>	<b>Tähis</b>	<b>Hulk</b>	<b>Märkus</b>
	<b>Materjal:</b>	S235	<b>Näitamata piirhälbed:</b>	<b>Mass:</b>	<b>Mõõt:</b>
			ISO-2768-mK	1.3 kg	1:5
<b>Teostas</b>	Sander Kukk	<b>Nimetus:</b> TSEMENTIITIMISE KASTI TÕSTEROOP			
<b>Kontrollis</b>	Kaarel Soots				
<b>Kinnitas</b>	Kaarel Soots				
 <b>Eesti Maaülikool</b> Estonian University of Life Sciences		<b>Leht:</b> 1/1	<b>Tähis:</b> TA 17/140592 A 03 00 K		

## Lisa 2. Tsementiitimise labortöö blankett

Eesti Maaülikool Fr. R. Kreutzwaldi 56 51014 Tartu	<p style="text-align: center;"><b>MATERJALIÕPETUS</b></p> <p style="text-align: center;">TI laboratoorne töö nr.      , MI laboratoorne töö nr.</p> <p style="text-align: center;"><b>TSEMENTIITIMINE</b></p>
<i>Juhendaja:</i>	<i>Üliõpilase nimi, kursus, eriala, allkiri:</i>
<p><b>Töö eesmärk:</b></p> <p>Tutvuda madalsüsinikteraste termokeemilise töötlemise ühe põhimooduse, tsementiitimisega ja viia praktikas läbi tsementiitimine madalsüsinikterasele.</p> <p><b>Töö käik:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Laboratoorseks tööks antakse kaks katsekeha. Ühele katsekehale teostada tsementiitimine koos termotöötlemisega ning teisele ainult termotöötlemine. Markeerida katsekehad sobiva tähisega ja määrata ümaralt külgpinnalt katsekehade algne pinnakõvadus sobiva kõvaduse määramise meetodiga. Katsekeha kõvadust tuleb mõõta kolm korda, katsetulemuste tabelisse kantakse kolme mõõtmistulemuse aritmeetiline keskmine. Samuti tuleb mõõta katsekehade gabariitmõõtmised, tulemused kanda katsetulemuste tabelisse.</li> <li>2. Vastavalt reeglile (1 h seisutusaega = 0,15 mm rikastatud pinnakihti) valida piisav seisutusaeg, et tagada soovitud rikastatud pinnakihi sügavus. Tsementiititava katsekeha seisutusaeg kanda katsetulemuste tabelisse.</li> <li>3. Määrata kirjanduse abil tsementiitimiseks sobilik kuumutustemperatuur ning kanda see katsetulemuste tabelisse.</li> <li>4. Asetada üks katsekeha kasti ja ümbritseda see igast küljest karbonisaatoriga.</li> <li>5. Asetada kastile kaas, sulgeda avad liivaga ja asetada kast eelkuumutatud ahju.</li> <li>6. Pärast seisutusaega võtta kast ahjust välja ja lasta sel jahtuda seisvas õhus.</li> <li>7. Järgnevate labortööde käigus teostada katsekehale terminine töötlemine (normaliseerimine ja karastamine) tingimustel, mis on välja toodud termotöötlemise protsesside parameetrite tabelis.</li> <li>8. Pärast terminist töötlemist lõigata tsementiititud katsekeha pooleks ja mõõta ristlõikepinnalt südamiku kõvadus ning ümaralt külgpinnalt pinnakõvadus. Teostada mõlemal juhul 3 mõõtmist ning mõõtmistulemuste aritmeetiline keskmine kanda katsetulemuste tabelisse.</li> </ol> <p><b>Vormistada kokkuvõte, mis sisaldab kokkuvõtet katsetulemustest. Analüüsida ja võrrelda saadud tulemusi teooriaga, nt:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. milline on vahe tsementiititud katsekeha pinnakihi ja südamiku lõppkõvaduse vahel;</li> <li>2. milline on erinevus tsementiititud katsekeha ja karastatud katsekeha pinnakõvadustel;</li> <li>3. milliseid terase omadusi saab tsementiitimisega parandada;</li> <li>4. millised on selle meetodi eelised ja puudused võrreldes teiste pindtugevdamise protsessidega;</li> <li>5. millised struktuurid terases protsessi tulemusena moodustusid;</li> <li>6. milliste tehnikas kasutatavate detailide puhul saaks seda meetodit rakendada jne.</li> </ol>	
<i>Laboratoorne töö teostatud ja juhendaja poolt arvestatud:</i>	

## TSEMENTIITIMINE

**Tabel 1.** Protsesside parameetrite ja katsetulemuste tabel

	<b>Katsekeha nr.</b>	<b>Katsekeha nr.</b>
<b>Teostatav protsess</b>	<b>Tsementiitimine</b>	<b>Karastamine</b>
<b>Terase mark</b>		
<b>Katsekeha tähis</b>		
<b>Läbimõõt, mm</b>		
<b>Pikkus, mm</b>		
<b>Katsekeha algne pinnakõvadus</b>		
<b>Seisutusaeg, min.</b>		
<b>Kuumutustemperatuur, °C</b>		
<b>Südamiku kõvadus pärast termotöötlemist</b>		
<b>Pinnakõvadus pärast termotöötlemist</b>		
<b>Pinnakõvaduse muutus</b>		

**Tabel 2.** Termotöötlemise protsesside parameetrid

<b>Parameeter</b>	<b>Väärtus</b>
Normaliseerimise temperatuur, °C	920
Normaliseerimise seisutusaeg, min	17
Normaliseerimise jahutuskeskkond	Seisvas õhus toatemperatuurini
Karastamise temperatuur, °C	910
Karastamise seisutusaeg, min	17
Karastuskeskkond	Vesi

### **Lisa 3. Täiendatud termika labori ohutustehnika eeskiri**

#### Enne töö algust

1. Tutvuda laboratoorse töö juhendiga ning selgitada välja töökäik.
2. Tutvuda laboratoorse töö blanketiga, vajadusel alustada täitmist auditooriumis.
3. Kasutada termilisel töötlemisel isikukaitsevahendeid (kittel, tulekindlad kindad, kaitseprillid jms).
4. Kitli nööbid ja varrukate kätised peavad olema kinni nööbitud. Rõivastel ei tohi olla ripnevaid osi. Püksisääred peavad olema jalanõude peal. Eririietus peab olema puhas ja kuiv.
5. Tsementiitimise läbiviimiseks asetada kuumutusahi tõmbekappi. Suitsuandur tuleb katta katikuga.
6. Enne seadmete ja ahjude kasutamist tuleb tutvuda seadme kasutusjuhendiga.
7. Ahjude sisselülitamisel tuleb veenduda, et ahjud oleksid vajalikule režiimile reguleeritud.
8. Katsekehad peavad olema puhtad, kuivad ning markeeritud.

#### Töö ajal

1. Vahetult enne katsekehade ahju asetamist ei tohi katsekehi puhastada bensiiniga, petrooliga jms.
2. Katsekehade tõstmiseks ahju või ahjust välja tuleb kasutada isikukaitsevahendeid (tulekindlaid kindaid, kitleid jms) ja tange. Tsementiitimise kasti tõstmiseks kasutada selleks ette nähtud tõsteroopi.
3. Ahjude peale ei tohi asetada kergesti süttivaid esemeid (töö juhendid, kasutusjuhendid jne), kuna ahju välimine pind kuumeneb töö käigus.
4. Kuuma katsekeha kukkumisel põrandale tuleb see kiiresti tangidega ülesse võtta, vajadusel valada peale vett või kasutada tulekustutit.
5. Kuumi katsekehi ja tange ei tohi asetada lauale või mõnele muule kuumust kartvale tasapinnale.
6. Karastuskeskkonna õli tuleb hoida tõmbekapis ning karastamisel õlisse tuleb tõmbekapp sisse lülitada.
7. Tulekahju puhkemisel kutsuda koheselt välja tuletõrje nimetades tulekahju täpse asukoha.
8. Kui tekib kahtlus, et seadmelt on võimalik saada elektrilööke, siis tuleb see koheselt eemaldada vooluvõrgust.



9. Kuni tuletõrje saabumiseni tegutseda vastavalt olukorrale, alustades tule lokaliseerimist olemasolevate kustutusvahenditega (süsihappe- ja vahtkustutid, liiv).
10. Kõigist avariidest, õnnetusjuhtumitest tuleb koheselt teatada oma juhendajale.
11. Kannatanule osutada vajalikku esmaabi, vajadusel kutsuda kiirabi.
12. Kuni vastava juurdluskomisjoni kohale jõudmiseni tuleb säilitada töökoht sellisena nagu ta oli õnnetus-juhtumi momendil kui see ei põhjusta ohtu kaastöötajate elu ja tervisele.
13. Juhul kui ollakse täiesti kindel, et tuletõrje häire pani tööle termilise töötlemise käigus tekkinud suits, siis tuleb sellest koheselt teatada laboratoorsete tööde juhendajat ja maja valvurit esimese korruse fuajees.
14. Pärast katsekehade kuumutamist tuleb katsekehad jahutada toatemperatuurini enne nende puhastamist tagist ja puhastamisel kasutada kaitseprille.

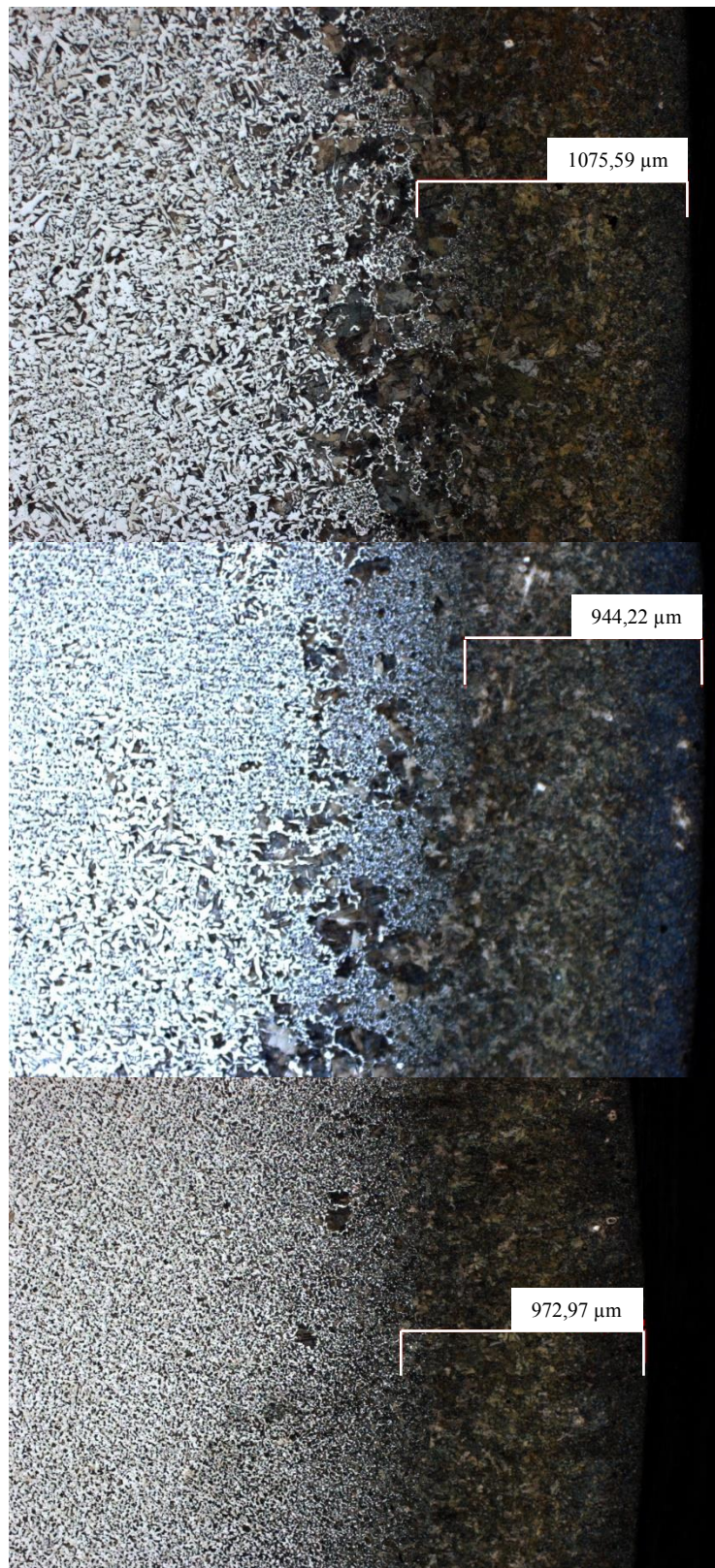
#### Pärast tööd

1. Lülitada välja kõik seadmed.
2. Panna kokku töövahendid.
3. Asetada katsekehad juhendaja poolt ettenäidatud kohta.
4. Korrastada töökoht ja teatada juhendajale puudustest töökohal.
5. Asetada kitlid ja kaitsevahendid ettenähtud kohta.
6. Lülitada välja ventilatsioon ja tõmbekapp.
7. Suitsuandurilt eemaldada katik.

#### Lisa 4. Pinnakõvaduse määramise mõõtmistulemused

<b>KAUGUS DETAILI SERVAST, mm</b>	<b>ALGOLEK KK0, HV 1/15</b>	<b>TSEMENTIHDITUD KK1, HV 1/15</b>	<b>NORMALISEERITUD KK2, HV 1/15</b>
0,2	149,6	274,1	329,2
0,4	149,6	300,2	346,1
0,6	149,6	310,3	340
0,8	149,6	302,5	314,4
1	149,6	284,4	286,9
1,2	149,6	237	240,8
1,4	149,6	191,3	205,9
1,6	149,6	179,7	180,9
1,8	149,6	153,4	163,8
2	149,6	144,2	156,7
<b>KAUGUS DETAILI SERVAST, mm</b>	<b>KARASTATUD KK3, HV 1/15</b>	<b>NOOLUTATUD KK3, HV 1/15</b>	<b>NOOLUTATUD KK4, HV 1/15</b>
0,2	726,7	641,3	630,2
0,4	738,8	647,9	650,3
0,6	758,4	651,5	641,9
0,8	751,4	632,4	622
1	744,7	606,4	585
1,2	741,8	553,2	518,6
1,4	713	478,5	414,3
1,6	619,8	398,1	340,9
1,8	472,5	316,5	288,3
2	361,7	287,2	263,4
<b>KAUGUS DETAILI SERVAST, mm</b>	<b>NOOLUTATUD KK5, HV 1/15</b>		
0,2	647,9		
0,4	655,2		
0,6	658,9		
0,8	644,3		
1	604,2		
1,2	540,9		
1,4	477,8		
1,6	390,1		
1,8	342,3		
2	309,1		

**Lisa 5. Tsementiitud katsekeha struktuuripildid koos rikastatud kihi sügavuse mõõtmistulemustega**



**Joonis Lisa 5.1.** Tsementiitud katsekeha KK1 struktuuripildid koos rikastatud kihi sügavuse mõõtmistulemustega



## **Lisa 6. Noolutatud katsekehade struktuuripildid**



**Joonis Lisa 6.1.** Noolutatud katsekeha KK4 pinnakiht 500-kordse suurendusega



**Joonis Lisa 6.2.** Noolutatud katsekeha KK5 pinnakiht 500-kordse suurendusega

Mina, \_\_\_\_\_,  
(*autori nimi*)

sünniaeg \_\_\_\_\_,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

---

---

---

---

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on \_\_\_\_\_,  
(*juhendaja(te) nimi*)

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

---

### **Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)